



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ

ΤΟΜΕΑΣ ΡΕΥΣΤΩΝ

ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΒΙΟΡΕΥΣΤΟΜΗΧΑΝΙΚΗΣ & ΒΙΟΪΑΤΡΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

**Πειραματική μελέτη σε προσομοιωτή αιμοδυναμικών
καταστάσεων του κυκλοφορικού συστήματος**

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΤΟΥ

ΠΑΤΡΙΚΙΟΥ ΔΗΜΗΤΡΙΟΥ

Επιβλέπων: Χρήστος Μανόπουλος
Δρ., Ε.ΔΙ.Π., Ε.Μ.Π.

Αθήνα, 2019

Πρόλογος

Το πειραματικό μέρος της παρούσας διπλωματικής εργασίας εκπονήθηκε στο Εργαστήριο Βιορευστομηχανικής & Βιοϊατρικής Τεχνολογίας του Τομέα Ρευστών της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών ΕΜΠ από τον Ιανουάριο του 2016, οπότε και αναλήφθηκε το θέμα της υπό την εποπτεία του Διευθυντή Καθηγητή κ. Σωκράτη Τσαγγάρη και την επίβλεψη του Δρ.-Ε.ΔΙ.Π. κ. Χρήστου Μανόπουλου (βάσει του Ν.4009, άρθρο 29, παρ. 2α), μέχρι τον Αύγουστο του 2016, οπότε και ξεκίνησε η επεξεργασία των πειραματικών αποτελεσμάτων και η συγγραφή της. Τον Σεπτέμβριο του 2016 λόγω της συνταξιοδότησης του Καθηγητή κ. Σωκράτη Τσαγγάρη ανέλαβε την επίβλεψη της διπλωματικής εργασίας ο Καθηγητής κ. Δημήτριος Μαθιουλάκης με τη συμμετοχή του Δρ.-Ε.ΔΙ.Π. κ. Χρήστου Μανόπουλου, (βάσει του Ν.4009, άρθρο 29, παρ. 2α όπως τροποποιήθηκε από το Ν.4386, άρθρο 27, παρ. 12α). Ωστόσο, η συμμετοχή στην επίβλεψη του Καθηγητή κ. Σωκράτη Τσαγγάρη συνέχισε επί της ουσίας να υφίσταται από τη θέση του Ομότιμου Καθηγητή ΕΜΠ ανελλιπώς, μέχρι το τέλος της, ενώ η συνεισφορά του Καθηγητή κ. Δημητρίου Μαθιουλάκη ήταν πολύ σημαντική στην επεξεργασία και ανάλυση των αποτελεσμάτων των πειραματικών μετρήσεων, ιδιαίτερα λόγω του γνωστικού του αντικειμένου «Τεχνικές Μετρήσεων στη Ρευστομηχανική και εφαρμογές τους». Τον Σεπτέμβριο του 2017 λόγω της ετήσιας ακαδημαϊκής εκπαιδευτικής άδειας εξωτερικού (Sabbatical) του Καθηγητή κ. Δημητρίου Μαθιουλάκη την επίβλεψη της διπλωματικής ανέλαβε ο Δρ.-Ε.ΔΙ.Π. κ. Χρήστος Μανόπουλος (υπό το ίδιο νομικό καθεστώς) και την συνέχισε αυτόνομα με βάση απόφαση της Σχολής Μηχανολόγων Μηχανικών. Από τη θέση αυτή θα ήθελα να αναφέρω ότι κατά τη τριετή διάρκεια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας εργάστηκα για πάνω από ενάμισι χρόνο ως τεχνικός στην κατασκευαστική εταιρεία «Ανυψωτική Α.Ε.». Ιδιαίτερες ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα Δρ. Χρήστο Μανόπουλο για τη βοήθεια, τις πολύτιμες συμβουλές, την υποστήριξη και την καθοδήγηση που μου παρείχε καθ' όλη τη διάρκεια εκπόνησης της εργασίας. Επίσης, ευχαριστώ θερμά τους επιβλέποντες Καθηγητές για την ενθάρρυνση και αμέριστη συμπαράσταση που μου προσέφεραν κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας, καθώς και τα υπόλοιπα μέλη της εξεταστικής επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Σπυρίδωνα Βουτσινά, και τον Αναπλ. Καθηγητή κ. Λεωνίδα Αλεξόπουλο.

Περίληψη

Πειραματική μελέτη σε προσομοιωτή αιμοδυναμικών καταστάσεων του κυκλοφορικού συστήματος

Η βιοϊατρική τεχνολογία ή βιοϊατρική μηχανική είναι η εφαρμογή των αρχών των θετικών επιστημών και των παραγώγων τους (π.χ. επιστήμες μηχανικού) στην ανάλυση και την επίλυση προβλημάτων στους τομείς της ιατρικής και της βιολογίας. Πρόκειται για μια συνεχή διαδικασία εφαρμογής βιοϊατρικών γνώσεων για το ανθρώπινο σώμα και τις λειτουργίες του, που σκοπό έχει αφενός την κατανόηση των φυσικών αρχών που το διέπουν και αφετέρου την ανάπτυξη κατάλληλης τεχνολογίας ώστε να καλυφθούν αποδοτικά οι ανάγκες υγείας της ανθρωπότητας.

Η βιορευστομηχανική είναι ο κλάδος της βιοϊατρικής τεχνολογίας που καλείται να ασχοληθεί με τις εφαρμογές της ρευστομηχανικής σε βιολογικά συστήματα και την ανάλυση των ρευστομηχανικών ιδιοτήτων των συστημάτων αυτών. Στα πλαίσια της βιορευστομηχανικής ανήκει και η μελέτη του καρδιαγγειακού συστήματος, των παθήσεών του και η ρευστομηχανική μελέτη του αίματος.

Οι παθήσεις του καρδιαγγειακού συστήματος έχουν ενοχοποιηθεί ως το κύριο αίτιο θνησιμότητας στον ανεπτυγμένο κόσμο, καθιστώντας επιτακτική την έρευνα γύρω από το συγκεκριμένο βιολογικό σύστημα τόσο από φυσιολογικής όσο και από παθολογικής άποψης. Η βιορευστομηχανική αποτελεί σημαντικό κομμάτι της έρευνας αυτής, καθώς η ανάλυση και κατανόηση των ρευστομηχανικών συνθηκών του καρδιαγγειακού συστήματος θα διευκολύνει σημαντικά τις μεθόδους πρόληψης, αλλά και θεραπείας των σχετικών παθήσεων. Σκοπός της εργασίας αυτής είναι η in-vitro μελέτη της συμπεριφοράς της ροής του αίματος εντός των φυσιολογικών αλλά και παθολογικών αρτηριών μέσω πειραματικής διάταξης η οποία λαμβάνει υπόψη και συσχετίζει την ενδοτικότητα του αγγείου, την αντίσταση στο άκρο του, την αδράνεια του ρευστού (αίματος) που ρέει μη μόνιμα σε παλλόμενη ροή μέσω κατάλληλου παλινδρομικού μηχανισμού.

Ως παράμετροι θα εξεταστούν η ενδοτικότητα, η αντίσταση, η συχνότητα επιβολής της παλλόμενης ροής και θα καταγραφεί η πίεση σε κατάλληλα σημεία και η παροχή μέσα στην αρτηρία.

Abstract

Experimental study on simulating the hemodynamic conditions of the circulatory system

Biomedical engineering, being the continuous proves of applying biological knowledge of the human body and its functions, has the purpose of understanding the natural laws that inhabit it and develop the appropriate technology as to cover efficiently the health needs of humanity.

Biofluid mechanics is the aspect of biomedical engineering that is called to deal with the applications of fluid mechanics in biological systems and analyze the fluid mechanical properties of those systems. Studying of the cardiovascular system, its diseases and the fluid mechanical study of blood, fall within the spectrum of biofluid mechanics studies.

The diseases of the circulatory system have ascended to the primary cause of death in the developed world, thus making research of the particular biological system imperative. Biofluid mechanics plays a significant role in this research, as analysis and understanding of the fluid mechanical conditions of the cardiovascular system will greatly assist in preventing, as well as curing the relevant diseases.

The aim of this project is the study of the physiology and behavior of the arteries via an experimental layout that factors in and correlates the vessel's compliance, its resistance and the inertia of the fluid (blood) that flows unsteady in a pulsating flow through an appropriate reciprocating mechanism.

The parameters of the experiment are the vessel's compliance, its resistance, the frequency of implementing the pulsating flow and the recorded outcomes are the pressure in specific points and the flow rate in the artery.

Περιεχόμενα

Πειραματική μελέτη σε προσομοιωτή αιμοδυναμικών καταστάσεων του κυκλοφορικού συστήματος...	1
Πρόλογος	2
Περίληψη	3
Abstract	3
Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή	8
1.1: Η μηχανική του καρδιαγγειακού συστήματος	8
1.2: Αντικείμενο διπλωματικής	9
1.3: Οργάνωση κειμένου	9
Κεφάλαιο 2: Βασικές έννοιες	10
2.1: Ο μηχανισμός της καρδιάς	10
2.1-1: Μηχανική λειτουργία της καρδιάς και φυσιολογία	10
2.1-2: Η καρδιά ως αντλία	11
2.1-3: Μηχανικά ανάλογα για κλινικό και πειραματικό σκοπό	12
2.1-4: Οι βαλβίδες και τα μηχανικά ανάλογα	13
2.2: Αορτή και Αρτηριακή Ενδοτικότητα	13
2.2-1: Η Φυσιολογία και η μηχανική λειτουργία της Αορτής	13
2.2-2: Αρτηριακή ενδοτικότητα (Compliance)	14
2.2-3: Μηχανικά ανάλογα αρτηριακής ενδοτικότητας	17
2.3: Αίμα και απώλειες της δυναμικής του αρτηριακού συστήματος	17
2.3-1: Το Αίμα ως συνεργαζόμενο μέσο	17
2.3-2: Ιδιότητες ρευστού στα ρευστομηχανικά πρότυπα	18
2.3-3: Αντιστάσεις και απώλειες του αρτηριακού συστήματος	18
2.3-4: Μηχανικά ανάλογα των βιολογικών αντιστάσεων	20
Κεφάλαιο 3: Αιμοδυναμικές καταστάσεις του κυκλοφορικού συστήματος	21
3.1: Επιλογή αιμοφόρων αγγείων	21
3.2: Αιμοδυναμικές παράμετροι στα επιλεγμένα αγγεία	21
3.2-1: Μέση παροχή	22
3.2-2: Ενδοτικότητα	27
3.2-3: Συχνότητα παλμών καρδιάς	30
Κεφάλαιο 4: Περιγραφή πειραματικής διάταξης	32
4.1 : Πειραματική διάταξη	32
4.1-1: Πρώτο δοχείο συγκέντρωσης νερού (Δοχείο τροφοδοσίας)	32
4.1-2: Βάνες Αντεπιστροφής	34
4.1-3: Κινητήρας, στρόφαλος και έμβολο	35
4.1-4: Δοχείο ενδοτικότητας	38
4.1-5: Βάνα πύλης	44
4.1-6: Δεύτερο δοχείο συγκέντρωσης νερού (Δοχείο κατάθλιψης)	45

4.2 : Μετρητικά όργανα.....	45
4.2-1: Ζυγαριά ακριβείας (Δυναμοκυψέλη).....	45
4.2-2: Αισθητήρες πίεσης.....	46
4.2-3: Αναλογικός-Ψηφιακός Μετατροπέας (ADC) και H/Y.....	47
4.2-4: Θερμόμετρο.....	48
4.2-5: Ταχύμετρο.....	49
Κεφάλαιο 5: Πειραματική διαδικασία και ανάλυση των μετρήσεων	50
5.1: Πειραματική διαδικασία.....	50
5.1-1: Μετρήσεις μόνιμης ροής (Steady Flow).....	51
5.1-2: Μετρήσεις μη μόνιμης ροής (Unsteady Flow)	51
5.2 : Ανάλυση των μετρήσεων.....	53
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα	56
6.1 : Διαγράμματα μόνιμης ροής (Steady Flow) Από τις μετρήσεις για μόνιμη ροή προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:	56
6.1-1 : Διαγράμματα μεγεθών μόνιμης ροής.....	56
6.2 : Διαγράμματα μη μόνιμης ροής.....	58
6.2-1 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241 \text{ ml}$	58
6.2-2 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241 \text{ ml}$	60
6.2-3 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241 \text{ ml}$	62
6.2-4 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$	64
6.2-5 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$	66
6.2-6 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$	68
6.2-7 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$	70
6.2-8 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$	72
6.2-9 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \text{ (x10}^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2\text{/kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$	74
6.2-10 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241 \text{ ml}$	76
6.2-11 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$	78
6.2-12 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$	80

6.2-13 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$.	82
6.2-14 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$.	84
6.2-15 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$.	86
6.2-16 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241 \text{ ml}$.	88
6.2-17 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$.	90
6.2-18 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$.	92
6.2-19 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$.	94
6.2-20 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$.	96
6.2-21 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$.	98
6.2-22 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241 \text{ ml}$.	100
6.2-23 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$.	102
6.2-24 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$.	104
6.2-25: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$.	106
6.2-26: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$.	108
6.2-27: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg} \text{)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$.	110
6.3 : Διαγράμματα Μηδενικής Ενδοτικότητας	112
6.3-1: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241 \text{ ml}$.	112
6.3-2: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$.	114
6.3-3: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$.	116
6.3-4: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάνας πύλης $y_R=5,6 \text{ mm}$.	118
6.3-5: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάνας πύλης $y_R=1,6 \text{ mm}$.	120
6.3-6: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8 \text{ mm}$.	122

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα	125
<i>7.1: Τάσεις στην μεταβολή των μεγεθών.....</i>	<i>125</i>
<i>7.2: Σύγκριση με πραγματικά μεγέθη.....</i>	<i>125</i>
<i>7.3: Μελλοντική έρευνα.....</i>	<i>128</i>
Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία.....	129
Παράρτημα	131

Κεφάλαιο 1: Εισαγωγή

1.1: Η μηχανική του καρδιαγγειακού συστήματος

Το καρδιαγγειακό σύστημα είναι ο μηχανισμός μεταφοράς του αίματος σε όλο το σώμα, συνεισφέροντας στην μεταφορά θρεπτικών ουσιών στους ιστούς και τα όργανα του σώματος και στην απομάκρυνση διαφόρων αποβλήτων και τοξικών ουσιών. Το κυκλοφορικό σύστημα αποτελείται από την καρδιά (τέσσερις θάλαμοι συμπεριλαμβανομένων των τεσσάρων βαλβίδων της καρδιάς), τα συστηματικά αιμοφόρα αγγεία που φέρουν το αίμα και το συλλέγουν από τα περιφερειακά όργανα, καθώς και τα πνευμονικά αγγεία που μεταφέρουν το αίμα μέσω του πνεύμονα για την ανταλλαγή οξυγόνου και διοξειδίου του άνθρακα.

Η καρδιά συσπάται για να τροφοδοτήσει το αίμα μέσα από τα συστηματικά και πνευμονικά αγγεία, και να δημιουργήσει την κυκλοφορία σε ολόκληρο το σώμα, και οι τέσσερις βαλβίδες της καρδιάς διατηρούν την κατεύθυνση της ροής.

Τα συστηματικά και πνευμονικά αγγεία είναι η αορτή και η πνευμονική αρτηρία, ενώ διαιρούνται σε κεντρικές και μικρές αρτηρίες, αρτηρίδια, τριχοειδή αγγεία, στα οποία συνδέονται τα φλεβίδια, ακολουθώντας οι φλέβες και καταλήγοντας στην κοίλη φλέβα όσο αφορά την μεγάλη κυκλοφορία και την πνευμονική φλέβα όσο αφορά τη μικρή. Από την αορτή προς τις αρτηρίες, τα αρτηρίδια, και τα τριχοειδή αγγεία, τα αγγεία διακλαδίζονται σε μια δενδροειδή κατασκευή, με τις διαμέτρους των αγγείων να μειώνονται, τη συνολική έκταση των αγγείων να αυξάνεται και το αγγειακό τοίχωμα να γίνεται λιγότερο ενδοτικό για κάθε μεταγενέστερη διακλάδωση.

Η αορτή και οι μεγαλύτερες αρτηρίες είναι αρκετά ελαστικές, και δρουν ως δεξαμενές που ρυθμίζουν την παλμικότητα της ροής από την καρδιά. Λόγω των μεταβαλλόμενων ιδιοτήτων των αγγείων, και των διακλαδώσεων, υπάρχουν αντανakλάσεις παλμικού κύματος στο σύστημα, οι οποίες μπορεί να έχουν συμφέρουσα ή μειονεκτική επίδραση στο δυναμικό φορτίο της καρδιάς και στην στεφανιαία αιμάτωση, ανάλογα με τη χρονική στιγμή του ανακλώμενου κύματος σε σχέση με το αρχικό κύμα.

Υπάρχει επίσης ενεργός αυτόνομος έλεγχος του μηχανισμού του σώματος, στα αρτηρίδια ώστε αυτά να αλλάζουν το διαμέτρημά τους μέσω νευρορύθμισης και διάφορων βιοχημικών διαδικασιών, για να ρυθμίσουν την πίεση και τη ροή του αίματος στα περιφερειακά όργανα.

Τριχοειδή αγγεία υπάρχουν όπου γίνεται η ανταλλαγή των θρεπτικών ουσιών και των μεταβολιτών.

Από τα τριχοειδή αγγεία στα φλεβίδια, τις φλέβες και την κοίλη φλέβα, τα αγγεία συγχωνεύονται κατά μήκος της κατεύθυνσης ροής για να σχηματίσουν μια ανάστροφη δενδροειδή κατασκευή, με αύξηση της ενδοτικότητας καθώς οδηγούμαστε στα μεγαλύτερα αγγεία.

Γενικά, η μέση εσωτερική πίεση και η παλμικότητα της πίεσης μειώνονται κατά μήκος της κατεύθυνσης της ροής του αίματος από τις αρτηρίες προς τις φλέβες, αν και στην αορτή και στις μεγαλύτερες αρτηρίες η παλμικότητα μπορεί να αυξηθεί λόγω αντανakλάσεων του παλμικού κύματος.

Όπως σε όλα τα ρευστομηχανικά συστήματα, η ροή του αίματος στο καρδιαγγειακό σύστημα υπακούει στους νόμους της διατήρησης μάζας, της διατήρησης της ορμής και της διατήρησης της ενέργειας, οι οποίοι περιγράφονται από εξισώσεις. Σε αντίθεση με πιο παραδοσιακές μορφές δικτύων σωληνώσεων τα αγγεία είναι συγκριτικά εύκαμπτα, και καταστατικές εξισώσεις του αγγειακού τοιχώματος προσδίδουν πρόσθετους περιορισμούς που επηρεάζουν σε μεγάλο βαθμό τη ροή του αίματος. Επιπλέον, η μηχανική πρόωση που παρέχεται από τους μύες της καρδιάς, διέπεται από τις δικές της καταστατικές εξισώσεις, συμπεριλαμβανομένων και των υπόλοιπων μερών (όπως οι βαλβίδες της καρδιάς).

1.2: Αντικείμενο διπλωματικής

Σκοπός της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι η in vitro διερεύνηση της ρευστομηχανικής λειτουργίας του καρδιαγγειακού συστήματος, μέσω πειραματικής διάταξης προσομοίωσης. Στα πλαίσια της διερεύνησης αυτής θα μελετηθεί η συμπεριφορά των αιμοδυναμικών μεγεθών του συστήματος, όπως η ενδοτικότητα, η αντίσταση, η πίεση και η παροχή, καθώς και οι συσχετισμοί μεταξύ των μεταβολών τους.

Η αντιπροσωπευτική προσομοίωση των μεγεθών αυτών, ώστε να είναι σύμφωνα με αυτά που απαντώνται στην ιατρική βιβλιογραφία, οδηγεί στην δημιουργία ενός επιτυχημένου βιορευστομηχανικού μοντέλου προσομοίωσης της καρδιαγγειακής λειτουργίας με πολυάριθμες εφαρμογές στην μετέπειτα έρευνα γύρω από το κυκλοφορικό σύστημα και τις ασθένειες του.

1.3: Οργάνωση κειμένου

Η διπλωματική εργασία αυτή χωρίζεται σε 8 κεφάλαια. Στο 1^ο κεφάλαιο διατυπώνεται ο σκοπός της εργασίας και τα προβλήματα που καλείται να επιλύσει. Στο 2^ο κεφάλαιο γίνεται περιγραφή των βασικών εννοιών της βιορευστομηχανικής που είναι αναγκαίες για την κατανόηση του αντικειμένου. Στο 3^ο κεφάλαιο αναλύονται τα αιμοδυναμικά μεγέθη σε συγκεκριμένα αγγεία και οι υπόλοιπες συνθήκες του καρδιαγγειακού συστήματος που αφορούν τις πειραματικές μετρήσεις που θα ακολουθήσουν. Στο 4^ο κεφάλαιο γίνεται αναλυτική περιγραφή της πειραματικής διάταξης και των μετρητικών οργάνων. Στο 5^ο κεφάλαιο επεξηγείται η μέθοδος λήψης μετρήσεων, άλλα και η μετέπειτα επεξεργασία τους. Στο 6^ο κεφάλαιο παραθέτονται οι μετρήσεις σε μορφή διαγραμμάτων με ορισμένες παραμέτρους και μεταβλητές. Στο 7^ο κεφάλαιο γίνεται προσπάθεια ερμηνείας των αποτελεσμάτων και εκτίμηση της συνεισφοράς της εργασίας. Τέλος στο 8^ο κεφάλαιο παρατίθεται η σχετική βιβλιογραφία.

Κεφάλαιο 2: Βασικές έννοιες

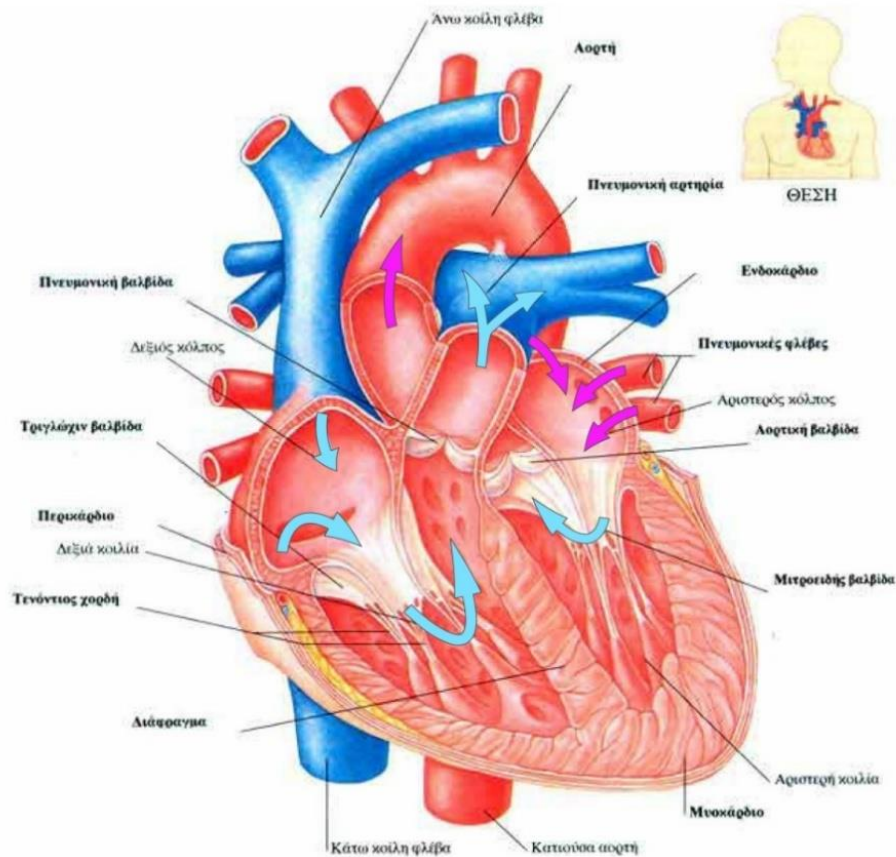
Στο κεφάλαιο αυτό περιγράφονται και επεξηγούνται οι έννοιες που είναι αναγκαίες για την κατανόηση της παρούσας εργασίας. Οι έννοιες αυτές είναι η ενδοτικότητα των αγγείων, οι μηχανικές ιδιότητες του αίματος ως εργαζόμενου μέσου, η αντίσταση στη ροή του αίματος και καθορίζουν την μηχανική λειτουργία του καρδιακού συστήματος. Τα παραπάνω αφορούν κατά κόρον τόσο την πειραματική διάταξη όσο και τις μετρήσεις και έτσι η περεταίρω ανάλυση τους γίνεται εξαρχής πριν την υπόλοιπη ανάπτυξη της εργασίας.

2.1: Ο μηχανισμός της καρδιάς

2.1-1: Μηχανική λειτουργία της καρδιάς και φυσιολογία

Η καρδιά είναι το πιο βασικό όργανο του κυκλοφορικού συστήματος ενός οργανισμού, καθώς είναι ο κύριος παράγοντας της δυναμικής τροφοδοσίας και της κίνησης του αίματος μέσω της μηχανικής της λειτουργίας.

Η καρδιά ως όργανο αποτελείται από τέσσερις χώρους. Τους δύο κόλπους που χωρίζονται μεταξύ τους από το μεσοκοιλιακό διάφραγμα και τις δύο κοιλίες που χωρίζονται μεταξύ τους από το μεσοκοιλιακό διάφραγμα. Ο δεξιός κόλπος έχει λεπτό τοίχωμα, σ' αυτόν εκβάλλουν η άνω και κάτω κοίλη φλέβα και ο στεφανιαίος κόλπος και επικοινωνεί με τη δεξιά κοιλία με στόμιο που φράσσεται από την τριγλώχιν βαλβίδα. Ο αριστερός κόλπος έχει λεπτό τοίχωμα, εκβάλλουν σ' αυτόν οι τέσσερις ή πέντε πνευμονικές φλέβες και επικοινωνεί με την αριστερή κοιλία με στόμιο που φράσσεται από την διγλώχιν ή μιτροειδή βαλβίδα. Η δεξιά κοιλία έχει τοίχωμα λεπτότερο από την αριστερή κοιλία και εκβάλλει στην πνευμονική αρτηρία. Η αριστερή κοιλία έχει τοίχωμα τριπλάσιου πάχους από τη δεξιά και εκβάλλει στην αορτή.



Εικόνα 2.1: Ανατομία της Καρδιάς

Όπως αναπαρίσταται με βέλη στην **Εικόνα 2.1** η κυκλοφορία του αίματος μέσα στην καρδιά γίνεται από τα δεξιά προς τα αριστερά. Η ποσότητα του αίματος που εξέρχεται από τα δεξιά είναι ίση με την ποσότητα που εισέρχεται στα αριστερά μέσω του πνεύμονα και στην συνέχεια αυτή η ποσότητα μέσω της αριστερής κοιλίας προωθείται στην αορτή.

Η καρδιά προσδίδει ενέργεια στο αίμα μέσω του μηχανισμού συστολής και διαστολής στους κόλπους και τις κοιλίες, ο οποίος μηχανισμός λειτουργεί ανά τακτά χρονικά διαστήματα ως καρδιακός κύκλος ή παλμός της καρδιάς, με αποτέλεσμα να μεταβάλλει την πίεση και την παροχή του αίματος.

Έτσι η πίεση που αναπτύσσεται σε αυτούς τους χώρους σε μια φυσιολογική λειτουργία κατανέμεται ως εξής :

- Στον δεξιό κόλπο αναπτύσσεται πίεση με μέγιστη τιμή 10 mmHg κατά την συστολή
- Στην δεξιά κοιλία αναπτύσσεται πίεση με μέγιστη τιμή 25 mmHg κατά την συστολή
- Στον αριστερό κόλπο αναπτύσσεται πίεση με μέγιστη τιμή 15 mmHg κατά την συστολή
- Στην αριστερή κοιλία αναπτύσσεται πίεση με μέγιστη τιμή 120 mmHg κατά την συστολή (πράγμα που δικαιολογεί και το μέγιστο πάχος σε αυτό το τμήμα)

Όποτε η φυσιολογική πίεση εισαγωγής του αίματος στην κεντρική αρτηρία του σώματος κυμαίνεται στα 120 mmHg.

Επόμενο πολύ σημαντικό στοιχείο είναι ο όγκος του αίματος που εμβολίζει η καρδιά σε κάθε συστολή - κτύπο, στην κεντρική αρτηρία. Σε κάθε συστολή της καρδιάς σε κανονική λειτουργία εκτοξεύονται 70 κυβικά εκατοστά αίματος. Αυτό αποτελεί βασικό στοιχείο για να είναι ρεαλιστικό οποιοδήποτε μοντέλο αντιπροσώπευσης της καρδιάς.

Παρά το γεγονός ότι η καρδιά είναι ένα μονήρες όργανο, είναι δυνατόν να διαιρεθεί, λειτουργικά, σε αριστερή καρδιά-αριστερές κοιλότητες-και δεξιά καρδιά-δεξιές κοιλότητες.

Βλέπουμε λοιπόν ότι η καρδιά σαν όργανο μπορεί απλοϊκά να αναπαρασταθεί ως ένας μηχανισμός ο οποίος διαδραματίζει ένα επαναλαμβανόμενο φαινόμενο, σε συγκεκριμένο και σταθερό χρονικό διάστημα, προώθησης μιας συγκεκριμένης ποσότητας ρευστού. Αυτή η αναλογία είναι το βασικό κριτήριο για να δημιουργηθεί ένα μηχανικό ανάλογο της καρδιάς για πειραματικούς σκοπούς που δεν επικεντρώνονται στην ίδια φυσιολογία και ανατομία της αλλά στην επίδραση που έχει αυτή στο καρδιαγγειακό σύστημα.

2.1-2: Η καρδιά ως αντλία

Η καρδιά στην πραγματικότητα αποτελεί πηγή πίεσης και παροχής. Λόγο της διπλής συστολής/διαστολής της αριστερής και δεξιάς περιοχής της καρδιάς μπορούμε να πούμε ότι η καρδιά είναι ένα σύστημα δυο αντλιών, συνδεδεμένων μεταξύ τους σε σειρά ώστε η ποσότητα εξαγωγής της μιας να είναι ίση με την ποσότητα εισαγωγής της άλλης. Από την στιγμή που αναπτύσσονται εμβρυολογικά οι αντλίες είναι στενά συνδεδεμένες ανατομικά και μοιράζονται διάφορες λειτουργίες και χαρακτηριστικά. Αυτά τα χαρακτηριστικά είναι ένας ενιαίος μηχανισμός διέγερσης ώστε να λειτουργούν σχεδόν συγχρονισμένα, ένας μοναδικός τύπος καρδιακού μυ που ανατομικά προσμοιάζει στο σκελετικό μυ αλλά με κάποιες διαφορές, και όπως προαναφέρθηκε παρόμοια δομή και κατανομή χώρων χωριζομένων από παρόμοιες βαλβίδες αντεπιστροφής. (Caro, 2012)

Παρά την ομοιότητα των δυο αυτών αντλιών στις περισσότερες διατριβές, όπως και σε αυτή, εξετάζονται οι ιδιότητες και η λειτουργία της μιας αντλίας κατά προτίμηση της αριστερής. Αυτό μπορεί να μην διευκρινίζεται ευρέως αλλά στις περισσότερες ανασκοπήσεις της μηχανικής της καρδιάς οι γνώσεις μας για την μηχανική της δεξιάς αντλίας είναι μη επαρκείς. Κύριος λόγος για αυτό είναι το γεγονός ότι από μηχανική σκοπιά η παθολογία του καρδιαγγειακού συστήματος επικεντρώνεται σε σημεία όπου η εσωτερική δυναμική είναι μεγάλη (μεγάλες τιμές πίεσης κλπ.) και προκαλείται λόγω ρευστομηχανικών ιδιοτήτων, γεωμετρίας και χαρακτηριστικών ιδιοτήτων των τοιχωμάτων.

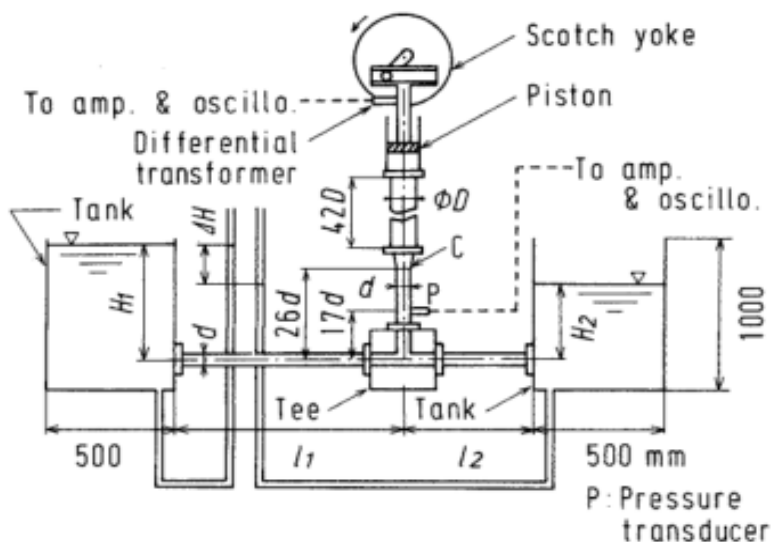
2.1-3: Μηχανικά ανάλογα για κλινικό και πειραματικό σκοπό

Η δημιουργία και η χρήση μηχανικής φύσεως αναπαράστασης του κυκλοφορικού μέσω αντλίας έγινε μόλις το 1812 από τον Le Gallois. Στη συνέχεια αυτά τα μηχανικά ανάλογα εξελίχθηκαν μέχρι το 1961 όπου η πρώτη κλινική εφαρμογή bypass διεξήχθη από τον Hall et al. (1962). Σχεδόν οκτώ χρόνια αργότερα ο Cooley (1969) εμφύτευσε την πρώτη τεχνητή καρδιά στο στήθος ενός ασθενούς για πάνω από 60 ώρες πριν από την αντικατάσταση της συσκευής με ένα μόσχευμα ανθρώπινης καρδιάς.

Για κλινική χρήση τα μηχανικά ανάλογα ή οι τεχνητές καρδιές αντιμετωπίζουν πολύ περισσότερα προβλήματα από ένα μηχανικό ανάλογο καρδιάς για πειραματικό εργαστηριακό σκοπό κυρίως λόγω των δυσκολιών όπως η αιμορραγία, η αιμόλυση, ο σχηματισμός θρόμβου, η λοίμωξη, και ενδεχόμενη βλάβη της συσκευής. Ιδιαίτερα ο σχηματισμός θρόμβου και η αιμόλυση φαίνεται να είναι θεμελιώδη προβλήματα που παρά την χρήση αντιπηκτικού και διάφορων παραγόντων αναστολής αιμοπεταλίων είναι υπαρκτά. Αυτό καθιστά την τεχνητή καρδιά μια ιδιαίτερη αντλία ως προς την σχεδίαση και κατασκευή. (Deutsch, 2006)

Στις αντλίες πειραματικής αναπαράστασης, αντίθετα, αυτά τα προβλήματα ελαχιστοποιούνται με αποτέλεσμα για παράδειγμα μια αντλία πιστονιού να μπορεί να αναπαραστήσει την καρδιά, χωρίς να λαμβάνεται υπόψη η καταστροφή του πλάσματος που αυτή θα επέφερε σε κλινική χρήση.

Έτσι, το μηχανικό ανάλογο της καρδιάς για αυτήν την περίπτωση περιορίζεται μόνο από το μέγεθος των ρευστομηχανικών μεγεθών του συνεργαζόμενου μέσου, και αποτελεί πηγή πίεσης και παροχής για το σύστημα. Για πρακτικούς, λειτουργικούς και κατασκευαστικούς λόγους, σαν αποτέλεσμα του προηγούμενου συμπεράσματος, σε προγενέστερες έρευνες για την αναπαράσταση του καρδιαγγειακού συστήματος και κατά συνέπεια της καρδιάς ο G. Liebau (1955) πρότεινε αντλίες πιστονιού και συγκεκριμένα χωρίς βαλβίδες για να μελετήσει το κυκλοφορικό στην περίπτωση παθήσεων των βαλβίδων της καρδιάς. Στην συνέχεια, οι Takagi & Takahashi (1983 & 1985) δημιούργησαν και μελέτησαν ένα αντιπροσωπευτικό μοντέλο για την κατανόηση της επίδρασης που έχει στο συνεργαζόμενο μέσο, δηλαδή το νερό, η λειτουργία της αντλίας πιστονιού σε ένα σύστημα σωληνώσεων χωρίς βαλβίδες. Το σύστημα αυτό απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.2**.



Εικόνα 2.2: Σχηματικό διάγραμμα του πειραματικού μηχανισμού (Takagi & Takahashi, 1983)

Βλέπουμε ότι το σύστημα αποτελούταν από μια αντλία πιστονιού με τον κατάλληλο μηχανισμό ταλάντευσης, ένα διακλαδωτήρα T (T-junction) σύνδεσης σωληνώσεων, σωληνώσεις και δυο δοχεία.

Αξιοποιώντας τις προηγούμενες αναλύσεις σε θεωρητικό αλλά και σε πρακτικό επίπεδο, στην συγκεκριμένη εργασία αναπαρίσταται ο καρδιακός μηχανισμός ως αντλία πιστονιού κατάλληλου μεγέθους και ισχύος ώστε

να υπερκαλύπτει το εύρος της παροχής του αίματος στην αορτή τις κεντρικές αρτηρίες και το σώμα, και το εύρος της πίεσης που ο καρδιαγγειακός μηχανισμός αναπτύσσει για διάφορες περιπτώσεις λειτουργίας του.

2.1-4: Οι βαλβίδες και τα μηχανικά ανάλογα

Οι βαλβίδες της καρδιάς όπως φάνηκε παραπάνω παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο στην κατεύθυνση της ροής του αίματος και την επαρκή φραγή των τεσσάρων χωρίων της καρδιάς.

Τα μηχανικά ανάλογα λειτουργούν στην λογική της αντεπιστροφής της ροής, δηλαδή της διατήρησης ροής ως προς μια κατεύθυνση, πράγμα που επιτυγχάνεται μέσω μηχανικών βαλβίδων αντεπιστροφής (check-valves). Παρότι η λειτουργία τους είναι αρκετά απλή, στην πραγματικότητα ο ρόλος όπου ασκούν στο σύστημα χαρακτηρίζει το ίδιο και την λειτουργικότητα του.

Είναι σαφές ότι η κίνηση σε πραγματικό βαλβίδα είναι μια πιο περίπλοκη διαδικασία από ό, τι μια απλή αλλαγή της κατάστασης μεταξύ ανοικτής και κλειστής φάσης. Η αλλαγή της αντίστασης καρδιακής βαλβίδας κατά την κίνηση της βαλβίδας είναι αξιοσημείωτη και μπορεί να μελετηθεί για βιολογικούς αλλά και μηχανολογικούς σκοπούς.

2.2: Αορτή και Αρτηριακή Ενδοτικότητα

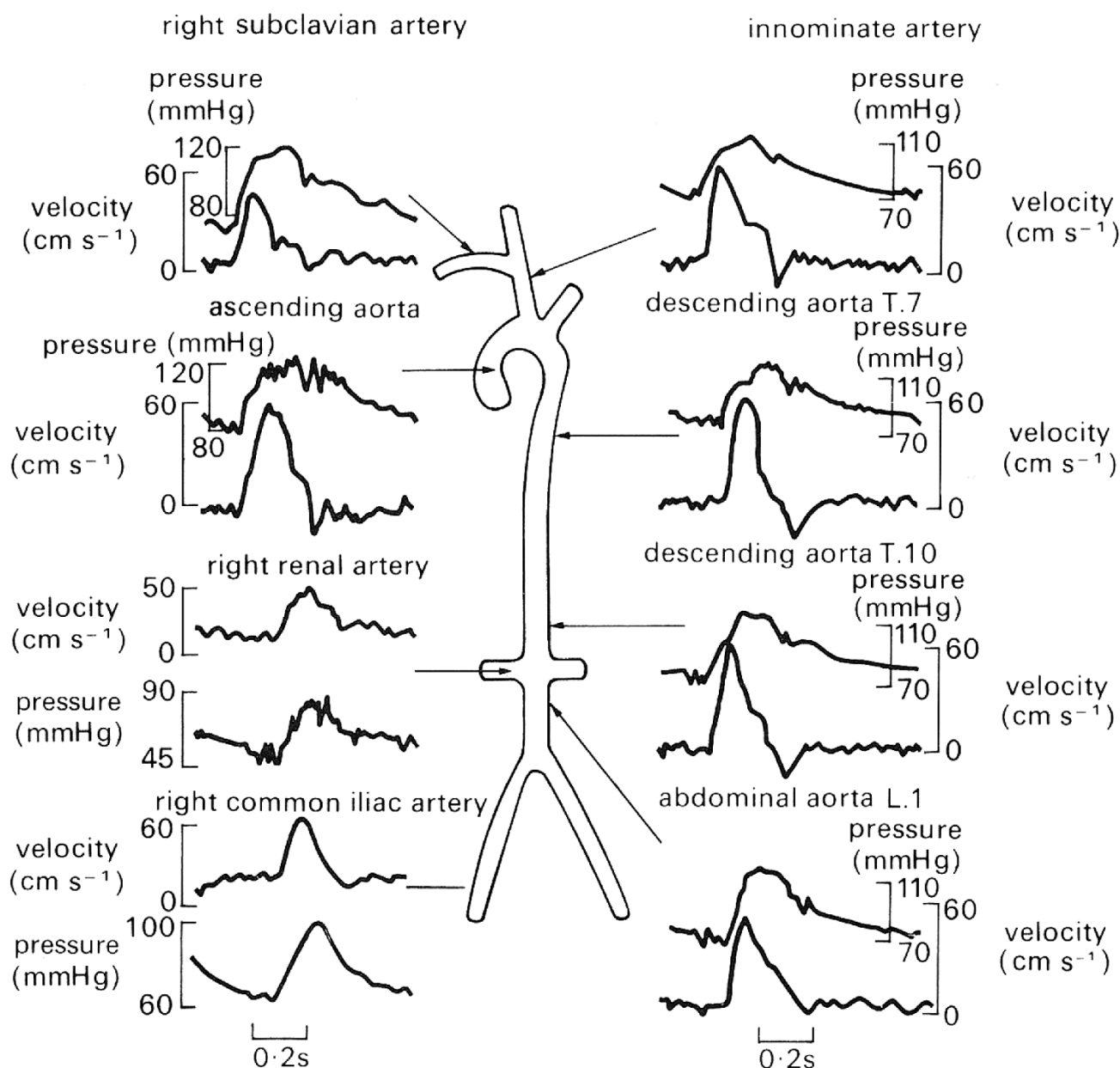
2.2-1: Η Φυσιολογία και η μηχανική λειτουργία της Αορτής

Παρότι είναι σαφές ότι η μεταφορά και η δυναμική του αίματος είναι αποτέλεσμα της λειτουργίας της καρδιάς ως κεντρική αντλία του κυκλοφορικού συστήματος, επίσης σημαντική είναι η αρτηριακή σύσπαση. Το αίμα προωθείται στο εσωτερικό των αρτηριών και με τις συσπάσεις των τοιχωμάτων τους, που συντελούνται με τη βοήθεια του μυϊκού ιστού που περιέχουν.

Η αορτή είναι η πρώτη και κυριότερη αρτηρία του σώματος. Αποτελεί το βασικό κορμό από όπου ξεκινούν όλες οι αρτηρίες της μεγάλης κυκλοφορίας. Το ερυθρό, πλούσιο σε οξυγόνο αίμα, διοχετεύεται από την καρδιά σε ολόκληρο τον οργανισμό διαμέσου της αορτής. Η αορτή εκφύεται από το αρτηριακό στόμιο της αριστερής κοιλίας της καρδιάς. Χωρίζεται από την αριστερή κοιλία με την αορτική βαλβίδα, με τη βοήθεια της οποίας το αίμα, όταν εξακοντιστεί από την καρδιά στην αορτή, δεν μπορεί να επιστρέψει πίσω. Μετά την έκφυσή της, η αορτή στρέφεται προς τα άνω. Το τμήμα αυτό λέγεται ανιούσα αορτή. Όταν φτάσει πίσω από το δεύτερο δεξιό πλευρικό χόνδρο, τότε κάμπτεται σε σχήμα τόξου. Το τμήμα αυτό λέγεται αορτικό τόξο. Μετά η αορτή κατέρχεται και σχηματίζει την κατιούσα αορτή. Κατευθύνεται προς τη μπροστινή επιφάνεια των σπονδύλων, οπότε το τμήμα αυτό λέγεται θωρακική αορτή. Τέλος, φτάνει στην κοιλία (κοιλιακή αορτή). Η ανιούσα αορτή μαζί με την πνευμονική αρτηρία βρίσκονται κλεισμένες στο περικάρδιο. Από την ανιούσα αορτή εκφύονται οι δυο στεφανιαίες αρτηρίες της καρδιάς (Carg, 2012).

Όταν το αίμα αντλείται από την καρδιά, και η πίεση αυξάνεται στην αορτή, αυτή διαστέλλεται. Όταν η πίεση πέφτει στη συνέχεια, η αορτή συστέλλεται, έτσι ώστε ο ρυθμός ροής μέσα στα μικρά περιφερικά αγγεία δεν πέφτει αμέσως στο μηδέν. Αυτή η δράση αποθήκευσης του αίματος στην αορτή και στις αρτηρίες κατά τη διάρκεια της συστολής και απόδοσή του κατά τη διαστολή περιγράφηκε για πρώτη φορά από τον Hales το 1733, αλλά το 1899 ήταν ο γερμανός φυσιολόγος Otto Frank όπου πρότεινε μια θεωρία που βασίζεται σε αυτή την ιδέα. Μπορούμε να πούμε λοιπόν ότι κύματα που δημιουργούνται από την καρδιά μεταφέρονται στην αορτή. Αυτά μπορεί να είναι κύματα πίεσης, παροχής ή ταχύτητας ή ακόμα και κύματα διατομής. Η ίδια ταχύτητα διάδοσης εφαρμόζεται σε όλους τους τύπους κυμάτων (Westerhof, 2010).

Σε μια σειρά από μελέτες οι τιμές της πίεσης και της παροχής έχουν μετρηθεί σε διάφορες θέσεις στις μεγάλες αρτηρίες των ανθρώπων. Οι κυματομορφές από την ανιούσα, την κατιούσα, την θωρακική και την κοιλιακή αορτή, καθώς και την δεξιά υποκλείδια, την ανώνυμη, την δεξιά νεφρική και την δεξιά κοινή λαγόνια αρτηρία στους ανθρώπους φαίνονται στην **Εικόνα 2.3** δίνοντας μια πρώτη ιδέα στο που κυμαίνονται τα μεγέθη τους.



Εικόνα 2.3: Ταυτόχρονη μέτρηση κυματομορφών πίεσης και ταχύτητας ροής του αίματος σε διάφορα σημεία του ανθρώπινου αρτηριακού δέντρου (Mills et al., 1970).

2.2-2: Αρτηριακή ενδοτικότητα (Compliance)

Το φαινόμενο λοιπόν της συστολής και διαστολής των αρτηριακών τοιχωμάτων είδαμε ότι επιδρά στην διατήρηση και μεταφορά του αίματος στο κυκλοφορικό σύστημα. Άμεσα συνυφασμένο μέγεθος με αυτό το φαινόμενο είναι η αρτηριακή ενδοτικότητα.

Η αρτηριακή ενδοτικότητα (Compliance) ορίζεται ως η μεταβολή του όγκου του αίματος εντός του αγγείου που προκαλείται από αύξηση της πίεσης κατά 1 mmHg. Η ύπαρξή της οφείλεται κατά κύριο λόγο στην σύσταση και δομή των τοιχωμάτων των αρτηριών. Οι τιμές λοιπόν της αρτηριακής ενδοτικότητας των αγγείων χαρακτηρίζουν την ικανότητα τους να μεταβάλουν τον όγκο τους για μεταβολή της πίεσης του αίματος κατά 1 mmHg, και διαφέρουν στις διάφορες κατηγορίες των αγγείων του κυκλοφορικού συστήματος. Σε μια μαθηματική αποτύπωση της ενδοτικότητας μπορούμε να ορίσουμε:

$$C = \frac{\Delta V}{\Delta P} \left(\frac{\text{ml}}{\text{mmHg}} = 7.50062 \times 10^{-4} \frac{\text{cm}^3}{\text{dyne}} = 7.50062 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{Kg}} = 7.50062 \times 10^{-9} \frac{\text{m}^3}{\text{Pa}} \right) \quad (2.2-1)$$

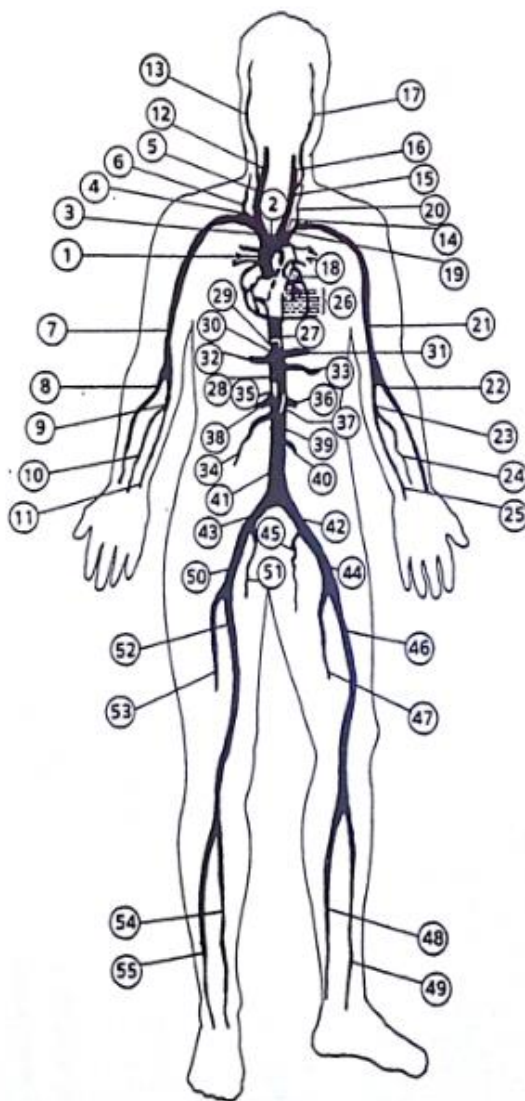
όπου ΔV η μεταβολή του όγκου και ΔP η μεταβολή της πίεσης.

Μια ενδεικτική ματιά της κατανομής των τιμών της αρτηριακής ενδοτικότητας στο ανθρώπινο αρτηριακό δένδρο (**Εικόνα 2.4**) βλέπουμε στην **Εικόνα 2.5**, όπου αντιλαμβανόμαστε ότι η αρτηριακή ενδοτικότητα φθίνει καθώς κινούμαστε από τις μεγάλες στις μικρές αρτηρίες, τα αρτηρίδια και τα τριχοειδή με μέγιστη και ελάχιστη τιμή κατά προσέγγιση $104.4 \cdot 10^{-11} \div 0.090 \cdot 10^{-11} (\text{m}^4 \text{s}^2 / \text{Kg} \equiv \text{m}^3 / \text{Pa})$ αντίστοιχα (Stergiopoulos, 1992).

Μια άλλη προσέγγιση της ενδοτικότητας στην βιβλιογραφία γίνεται μέσω της γεωμετρίας και του μέτρου ελαστικότητας των αγγείων μέσω της παρακάτω σχέσης (Noordergraaf, 1963):

$$\frac{dS}{dP} = \frac{1}{L} \frac{d(LS)}{dP} = \frac{1}{L} \frac{dV}{dP} = \frac{C}{L} = \frac{3S(a+1)^2}{(2a+1)E} \left(\frac{\text{cm}^3 \text{s}^2}{\text{g}} \right) \quad (2.2-2)$$

όπου S η εγκάρσια διατομή του αγγείου, L το μήκος του, E το μέτρο ελαστικότητας, και $a=r/h$, με r την ακτίνα του αγγείου και h το πάχος του τοιχώματος του αγγείου.



Εικόνα 2.4: Αρτηριακό δένδρο του ανθρώπου (Stergiopoulos, 1992)

Segment	Name	Length (cm)	Proximal radius (cm)	Distal radius (cm)	Volume compliance ($10^{-6} \text{ cm}^5 \text{ dyn}^{-1}$)
1	Ascending aorta	4.0	1.470	1.440	104.400
2	Aortic Arch A	2.0	1.120	1.120	29.600
3	Innominate	3.4	0.620	0.620	13.500
4	R. subclavian A	3.4	0.423	0.423	5.600
5	R. carotid	17.7	0.370	0.370	21.360
6	R. vertebral	14.8	0.188	0.183	1.682
7	R. subclavian B	42.2	0.403	0.236	33.870
8	R. radial	23.5	0.174	0.142	1.877
9	R. ulnar A	6.7	0.215	0.215	1.110
10	R. interosseous	7.9	0.091	0.091	0.090
11	R. ulnar B	17.1	0.203	0.183	2.210
12	R. internal carotid	17.7	0.177	0.083	0.943
13	R. external carotid	17.7	0.177	0.083	0.943
14	Aortic arch B	3.9	1.070	1.070	52.100
15	L. carotid	20.8	0.370	0.370	25.100
16	L. internal carotid	17.7	0.177	0.083	0.943
17	L. external carotid	17.7	0.177	0.083	0.943
18	Thoracic aorta A	5.2	0.999	0.999	59.700
19	L. subclavian A	3.4	0.423	0.423	5.600
20	Vertebral	14.8	0.188	0.183	1.682
21	L. subclavian B	42.2	0.403	0.236	33.870
22	L. radial	23.5	0.174	0.142	1.877
23	L. ulnar A	6.7	0.215	0.215	1.110
24	L. interosseous	7.9	0.091	0.091	0.090
25	L. ulnar B	17.1	0.203	0.183	2.210
26	Intercostals	8.0	0.200	0.150	3.000
27	Thoracic aorta B	10.4	0.675	0.645	47.600
28	Abdominal aorta A	5.3	0.610	0.610	20.400
29	Celiac A	1.0	0.390	0.390	1.360
30	Celiac B	1.0	0.200	0.200	1.000
31	Hepatic	6.6	0.220	0.220	2.300
32	Gastric	7.1	0.180	0.180	1.510
33	Splenic	6.3	0.275	0.275	3.740
34	Superior mesenteric	5.9	0.435	0.435	10.400
35	Abdominal aorta B	1.0	0.600	0.600	4.000
36	L. renal	3.2	0.260	0.260	1.670
37	Abdominal aorta C	1.0	0.590	0.590	3.800
38	R. renal	3.2	0.260	0.260	1.670
39	Abdominal aorta D	10.6	0.580	0.548	33.900
40	Inferior mesenteric	5.0	0.160	0.160	0.792
41	Abdominal aorta E	1.0	0.520	0.520	3.500
42	R. common iliac	5.8	0.368	0.350	4.580
43	L. common iliac	5.8	0.368	0.350	4.580
44	L. external iliac	14.4	0.320	0.270	15.620
45	L. internal iliac	5.0	0.200	0.200	3.300
46	L. femoral	44.3	0.259	0.190	13.640
47	L. deep femoral	12.6	0.255	0.186	1.130
48	L. posterior tibial	32.1	0.247	0.141	2.206
49	L. anterior tibial	34.3	0.130	0.130	0.842
50	R. external iliac	14.4	0.320	0.270	15.620
51	R. internal iliac	5.0	0.200	0.200	3.300
52	R. femoral	44.3	0.259	0.190	13.640
53	R. deep femoral	12.6	0.255	0.186	1.130
54	R. posterior tibial	32.1	0.247	0.141	2.206
55	R. anterior tibial	34.3	0.130	0.130	0.842

Εικόνα 2.5: Γεωμετρικά μεγέθη αγγείων και κατανομή της ενδοτικότητας στο αρτηριακό δένδρο (Stergiopoulos, 1992)

2.2-3: Μηχανικά ανάλογα αρτηριακής ενδοτικότητας

Η προσομοίωση της αρτηριακής ενδοτικότητας επιτυγχάνεται μηχανικά είτε με ελαστικούς αγωγούς είτε με εντοπισμένα στοιχεία. Ενώ η αναπαράσταση με αγωγούς φαντάζει μια πιο «πιστή» αναπαράσταση της αρτηριακής ενδοτικότητας, εμφανίζει κάποια πολυπλοκότητα ως προς την μελέτη της ενδοτικότητας. Τα εντοπισμένα στοιχεία ενδοτικότητας είναι πιο διαδεδομένα για πειραματικούς σκοπούς. Αυτά αποτελούν δοχεία τα οποία προσομοιώνουν την αρτηριακή ενδοτικότητα με διάφορους τύπους, δυο βασικοί εκ των οποίων είναι το σύστημα δοχείου με ελατήριο και κοχλία (Arabia, 1984) ή το κλειστό δοχείο ενδοτικότητας με ποσότητα αέρα κατά τα πρότυπα Windkessel (Schima et al., 1990n& Westerhof et al., 2010).

Τα δοχεία Windkessel λόγω της απλότητας τους χρησιμοποιούνται περισσότερο από άλλα στην πειραματική έρευνα. Σε αυτά η ποσότητα και η πίεση του αέρα εντός του δοχείου καθορίζει την ενδοτικότητα του συστήματος και για τον υπολογισμό της χρησιμοποιείται η γνωστή σχέση:

$$C = -\frac{\Delta V}{\Delta P} \left(\frac{ml}{mmHg} \right) \quad (2.2-3)$$

όπου V όγκος και P η πίεση του αέρα. Το αρνητικό πρόσημο προκύπτει από το γεγονός ότι η αύξηση της πίεσης του αέρα συνεπάγεται μείωση του όγκου του.

Το δοχείο Windkessel αποτελεί το δοχείο ενδοτικότητας που επιλέχθηκε στην παρούσα εργασία.

2.3: Αίμα και απώλειες της δυναμικής του αρτηριακού συστήματος

2.3-1: Το Αίμα ως συνεργαζόμενο μέσο

Το αίμα αποτελεί το συνεργαζόμενο μέσο του κυκλοφορικού συστήματος, και επιτελεί ζωτικές λειτουργίες του εκάστοτε οργανισμού. Σαν ρευστό, το αίμα, μπορεί να θεωρηθεί ως ένα μίγμα ελαστικών κυττάρων εντός ενός Νευτώνειου ρευστού, του πλάσματος. Οι ρευστομηχανικές ιδιότητες του αίματος διαφέρουν ανάλογα με την κατάσταση του αίματος και εξαρτώνται από πολλούς παράγοντες. Οι βασικότερες ιδιότητες προς μελέτη για μια μοντελοποίηση είναι το ιξώδες του αίματος και η συμπεριφορά του ως Νευτώνειο ή μη Νευτώνειο ρευστό. Ενώ το ιξώδες του αίματος εξαρτάται από πολλούς παράγοντες βιολογικούς και φυσικούς καταστατικούς (όπως η θερμοκρασία), εμφανίζει σημαντικές μεταβολές ανάλογα με τον ρυθμό διάτμησης του αίματος μέσα στο κυκλοφορικό σύστημα. Αντίστοιχη μεταβολή εμφανίζει στην συμπεριφορά του ως Νευτώνειο ή μη Νευτώνειο ρευστό. Η διατμητική τάση έχει μετρηθεί στα εκάστοτε μέρη του αρτηριακού δένδρου και αναφέρεται στον πίνακα της **Εικόνας 2.6**.

Wall shear stress ($N m^{-2}$) for various blood vessels

Ascending aorta	0.43
Abdominal aorta	0.53
Femoral artery	0.80
Arteriole	4.8
Capillary	3.7
Venule	3.0
Inferior vena cava	0.64
Main pulmonary artery	0.28

Εικόνα 2.6: Η διατμητική τάση στα εκάστοτε μέρη του αρτηριακού δένδρου (Caro, 2012)

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία η μη Νευτώνεια συμπεριφορά του αίματος είναι αμελητέα για υψηλές τιμές ρυθμού διάτμησης, άρα και κατά συνέπεια, όπως απεικονίζεται στον πίνακα της **Εικόνας 2.6**, στις μεγάλες και μεσαίες αρτηρίες του αρτηριακού συστήματος, ενώ οι τιμές του ιξώδους κυμαίνονται από 3 έως 4 cP $\sim 10^{-3}$ Pa·s.

2.3-2: Ιδιότητες ρευστού στα ρευστομηχανικά πρότυπα

Οι βασικότερες ιδιότητες που λαμβάνονται υπόψιν στα πρότυπα της αρτηριακής κυκλοφορίας και στα μηχανικά ανάλογα είναι το ιξώδες ή συνεκτικότητα και η αδράνεια του ρευστού.

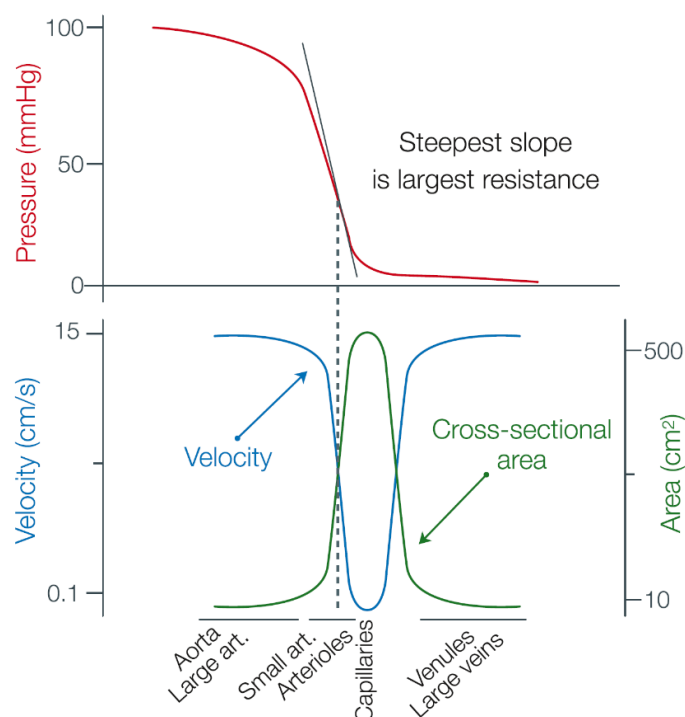
Η συνεκτικότητα του συνεργαζόμενου μέσου δεν κρίνεται πάντα σημαντική, η σημασία της εξαρτάται από την διάταξη και λειτουργία του μηχανικού αναλόγου συστήματος. Η αδράνεια του ρευστού καθορίζεται από την μάζα του, η οποία εξαρτάται από τις διαστάσεις του κυκλώματος. Στα περισσότερα πειραματικά συστήματα δεν δίνεται ιδιαίτερη σημασία στην αδράνεια του ρευστού, αν και οι μικρές διαστάσεις των συστημάτων συμβάλλουν στην μικρότερη έως αμελητέα επίδραση της αδράνειας στο σύστημα (Schima et al., 1990).

Το συνεργαζόμενο μέσο σε αυτά τα συστήματα είναι κατά κύριο λόγο το νερό, έχοντας σχετικά καλή αναλογία με το αίμα σε μεγάλες και μεσαίες αρτηρίες, ως Νευτώνιο ρευστό με ιξώδες 4 φορές μικρότερο. Σε συγκεκριμένες περιπτώσεις όπου κρίνεται σημαντική η επίδραση της συνεκτικότητας χρησιμοποιούνται άλλα ρευστά ή ειδικά μείγματα με μεγαλύτερη συνεκτικότητα.

2.3-3: Αντιστάσεις και απώλειες του αρτηριακού συστήματος

Οι αντιστάσεις που δέχεται το αίμα κατά την διέλευση του από τα αγγεία του κυκλοφορικού μπορούν να εκφραστούν από την μηχανική των ρευστών (όπως από το νόμο του Poiseuille με πολλές παραδοχές) για να διεξαχθούν κάποια συμπεράσματα για την κατανομή των τιμών αντίστασης στα μέρη του αρτηριακού δένδρου. Η αορτή και οι μεγάλες αρτηρίες δεν έχουν μεγάλες τιμές αντίστασης λόγω του μεγέθους και της διατομής τους. Αντίθετα οι μικρές αρτηρίες και τα αρτηρίδια έχουν μεγάλες τιμές αντίστασης, με συνέπεια το μεγαλύτερο ποσοστό αντίστασης του αρτηριακού δένδρου να επικεντρώνεται σε αυτές, λόγω του μεγέθους αλλά και του πλήθους τους. Χαρακτηριστικά αναφέρεται ότι η συνολική αντίσταση των αρτηριδίων είναι περίπου 100 φορές μεγαλύτερη από την αντίσταση της αορτής (Westerhof, 2010).

Ως εκ τούτου, η πτώση πίεσης στην αορτή είναι περίπου 1% της συνολικής πτώσης πίεσης. Ενδεικτικά απεικονίζεται στην **Εικόνα 2.7** η κατανομή πίεσης και ταχύτητας στο κυκλοφορικό και τα μεγέθη των τερματικών τιμών εμπέδησης του αρτηριακού δένδρου φαίνονται στην **Εικόνα 2.8**.



Εικόνα 2.7: Κατανομή πίεσης και ταχύτητας στο κυκλοφορικό (Westerhof, 2010).

Segment	Total resistance (N s m^{-5})	Terminal compliance ($\text{m}^5 \text{N}^{-1}$)
6	0.60100E + 10	0.30955E - 10
8	0.52800E + 10	0.35235E - 10
10	0.84300E + 11	0.22069E - 11
11	0.52800E + 10	0.35235E - 10
12	0.13900E + 11	0.13384E - 10
13	0.13900E + 11	0.13384E - 10
16	0.13900E + 11	0.13384E - 10
17	0.13900E + 11	0.13384E - 10
20	0.60100E + 10	0.30955E - 10
22	0.52800E + 10	0.35235E - 10
24	0.84300E + 11	0.22069E - 11
25	0.52800E + 10	0.35235E - 10
26	0.13900E + 10	0.13384E - 09
31	0.36300E + 10	0.51251E - 10
32	0.54100E + 10	0.34389E - 10
33	0.23200E + 10	0.80191E - 10
34	0.93000E + 09	0.20005E - 09
36	0.11300E + 10	0.16464E - 09
38	0.11300E + 10	0.16464E - 09
40	0.68800E + 10	0.27041E - 10
45	0.79360E + 10	0.23443E - 10
47	0.47700E + 10	0.39003E - 10
48	0.47700E + 10	0.39003E - 10
49	0.55900E + 10	0.33281E - 10
51	0.79360E + 10	0.23443E - 10
53	0.47700E + 10	0.39003E - 10
54	0.47700E + 10	0.39003E - 10
55	0.55900E + 10	0.33281E - 10

Εικόνα 2.8: Τερματικές τιμές εμπέδησης (Stergiopoulos, 1992).

2.3-4: Μηχανικά ανάλογα των βιολογικών αντιστάσεων

Οι αντιστάσεις του αρτηριακού δικτύου προσομοιάζονται στα ρευστομηχανικά μοντέλα χρησιμοποιώντας κυρίως εντοπισμένα στοιχεία αντιστάσεων. Όπως αναφέρθηκε παραπάνω σημαντικότερο ρόλο παίζουν οι περιφερικές αντιστάσεις οι οποίες χωρίζονται σε δυο κατηγορίες, τις γραμμικές και τις μη γραμμικές αντιστάσεις.

Οι γραμμικές αντιστάσεις προδίδουν πιο ρεαλιστικές προσομοιώσεις και κατασκευάζονται χρησιμοποιώντας πολλά αγγεία πολύ μικρής διατομής παράλληλα τοποθετημένα από τα οποία διέρχεται το ρευστό (Westerhof, 2010). Η πτώση πίεσης που προκαλούν υπολογίζεται από την σχέση γραμμικών απωλειών:

$$\Delta P = N\lambda \frac{1}{d} \frac{\rho}{2} u^2 \quad (2.3-1)$$

όπου N ο αριθμός των αγγείων, λ ο συντελεστής τριβής του αγγείου, l το μήκος του αγγείου, d η διάμετρος του αγγείου, ρ η πυκνότητα του ρευστού και u η ταχύτητά του.

Οι μη γραμμικές αντιστάσεις αποτελούν απλές βάνες οι οποίες προκαλούν τοπική μεταβολή των αντιστάσεων μέσω μεταβολής της διατομής του αγωγού, και για αυτόν το λόγο είναι πιο διαδεδομένες στα πειράματα. Η πτώση πίεσης που προκαλούν υπολογίζεται από την σχέση εντοπισμένων απωλειών:

$$\Delta P = \zeta \frac{\rho}{2} u^2 \quad (2.3-2)$$

όπου ο συντελεστής τοπικών απωλειών ζ εξαρτάται από το είδος της βάνας και το πόσο ανοιχτή είναι.

Θα πρέπει να αναφερθεί ότι εκτός από τα εντοπισμένα στοιχεία αντιστάσεων, η συνολική υδραυλική αντίσταση του κυκλώματος καθορίζεται από το μήκος και τις διατομές των αγωγών, τις συνδέσεις, τις διακλαδώσεις, τις αλλαγές των διατομών κλπ. τα οποία μεγέθη πολλές φορές θεωρούνται δευτερεύοντα ή αμελητέα.

Στην περίπτωση που δεν μας ενδιαφέρει ο υπολογισμός των αντιστάσεων στα επιμέρους σημεία ή τμήματα του κυκλώματος παρά μόνον των συνολικών αντιστάσεων, τότε είναι δυνατόν να χρησιμοποιηθεί η γενική σχέση:

$$R = \frac{\Delta P}{Q_m} \quad (2.3-3)$$

όπου ΔP διαφορά πίεσης μεταξύ δύο σημείων ενός τμήματος του κυκλώματος και Q_m μέση παροχή που διέρχεται από αυτό.

Κεφάλαιο 3: Αιμοδυναμικές καταστάσεις του κυκλοφορικού συστήματος

Σε αυτό το κεφάλαιο, με χρήση της σχετικής βιβλιογραφίας, αναλύονται οι καταστάσεις των αιμοδυναμικών μεγεθών σε συγκριμένα αγγεία του ανθρώπινου σώματος, και τεκμηριώνεται ο λόγος επιλογής των αγγείων αυτών με βάση τα γεωμετρικά και λειτουργικά χαρακτηριστικά της πειραματικής διάταξης.

3.1: Επιλογή αιμοφόρων αγγείων

Η πειραματική διάταξη έχει σκοπό την προσομοίωση των αιμοδυναμικών συνθηκών στα ανθρώπινα αγγεία κατά την καρδιακή λειτουργία. Στην διάταξη κατά την διάρκεια των πειραματικών μετρήσεων, χρησιμοποιήθηκαν σωλήνες εσωτερικής διαμέτρου 8mm. Επομένως, κύριο κριτήριο στην επιλογή των αγγείων που προσομοιώνονται είναι η διάμετρος **D**, η οποία πρέπει να είναι το δυνατόν πλησιέστερη στην διάμετρο της σωλήνωσης.

Σύμφωνα με την σχετική βιβλιογραφία (Noordergraaf 1963, Avolio 1980) οι ανθρώπινες αρτηρίες με το πλησιέστερο μέσο μέγεθος διαμέτρου στα 8mm είναι αυτές στον παρακάτω πίνακα.

Όνομα αγγείου	D (mm) (Noordergraaf 1963)	D (mm) (Avolio 1980)
Υποκλείδιος	8.6	8.0
Κοινή Καρωτίδα	7.8	7.4
Άνω Μεσεντέριος	8.6	8.6
Κοινή Λαγόνιος	10.4	10.4
Έξω Λαγόνιος	8.2	5.8
Μηριαία	6.8	4.8

Πίνακας 3.1-1: Μέσοι διάμετροι αιμοφόρων αγγείων.

Οι παραπάνω τιμές διαφέρουν από άτομο σε άτομο και επηρεάζονται από παράγοντες όπως η ηλικία, το φύλο και η σωματική διάπλαση. Παραμένουν όμως για τους σκοπούς του πειράματος τα αγγεία που η διάταξη θα επιτύχει την βέλτιστη προσομοίωση.

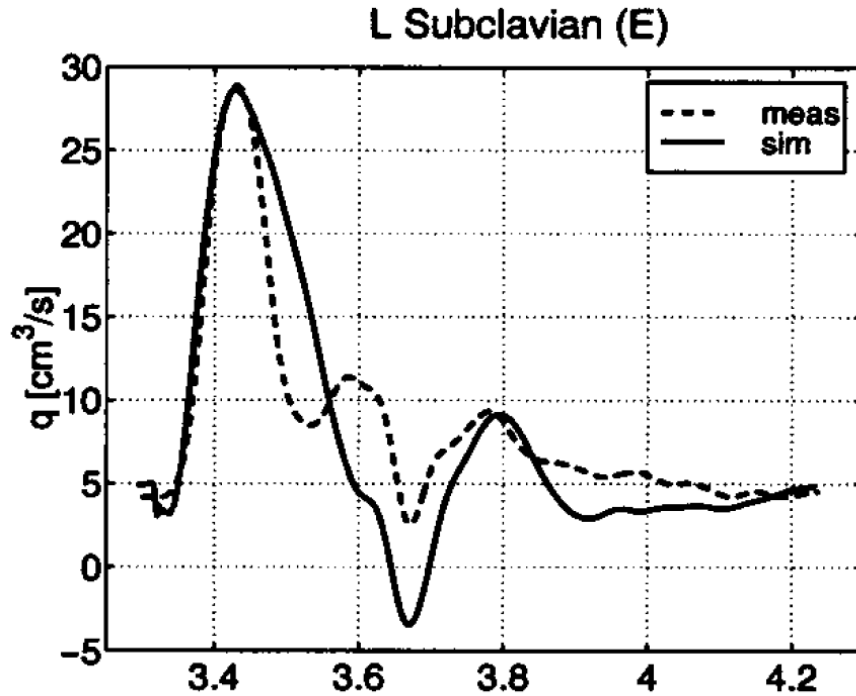
Ειδική περίπτωση αποτελεί η αορτή. Αν και έχει διάμετρο αρκετά μεγαλύτερη από τα προαναφερθέντα αγγεία, η θέση της στο ανθρώπινο κυκλοφορικό σύστημα είναι αντίστοιχη με αυτήν της σωλήνωσης της διάταξης, οπότε οι αιμοδυναμικές καταστάσεις της θα μελετηθούν επίσης στο επόμενο κεφάλαιο. Παρόλο που η διάμετρος του αγωγού της διάταξης είναι μικρότερη από αυτήν της αορτής, ο παραλληλισμός της λειτουργίας γίνεται για την αορτή επειδή στην διάταξη μπορούμε να μεταβάλλουμε την ενδοτικότητα στα επίπεδα της ενδοτικότητας της αορτής καθώς και να μεταβάλλουμε την αντίσταση στα επίπεδα που απαντάται μετά τον αορτικό διχασμό. Επιπλέον, η επιβολή της παλλόμενης ροής λόγω των βαλβίδων αντεπιστροφής προσομοιάζεται αρκετά καλά με την ροή του αίματος που διαθέτει η καρδιά στην αορτή.

3.2: Αιμοδυναμικές παράμετροι στα επιλεγμένα αγγεία.

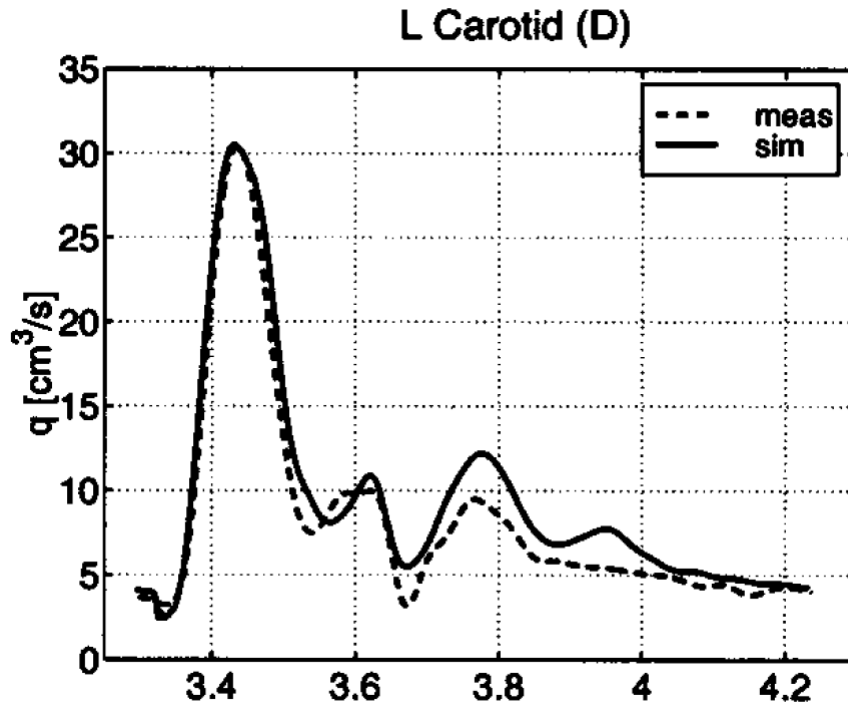
Οι αιμοδυναμικές παράμετροι που αφορούν τα αγγεία του Πίνακα 3.1-1 και την αορτή, για τους σκοπούς αυτής της εργασίας, είναι η μέση παροχή και η ενδοτικότητα. Επίσης, στην βιβλιογραφία αναζητούνται παράμετροι όπως η συχνότητα των καρδιακών παλμών. Τα μεγέθη αυτά είναι αναγκαία για να οριστούν οι παράμετροι της πειραματικής διάταξης, ώστε τα αποτελέσματα των μετρήσεων να έχουν αντίκρισμα στην πραγματικότητα του ανθρώπινου κυκλοφορικού συστήματος.

3.2-1: Μέση παροχή

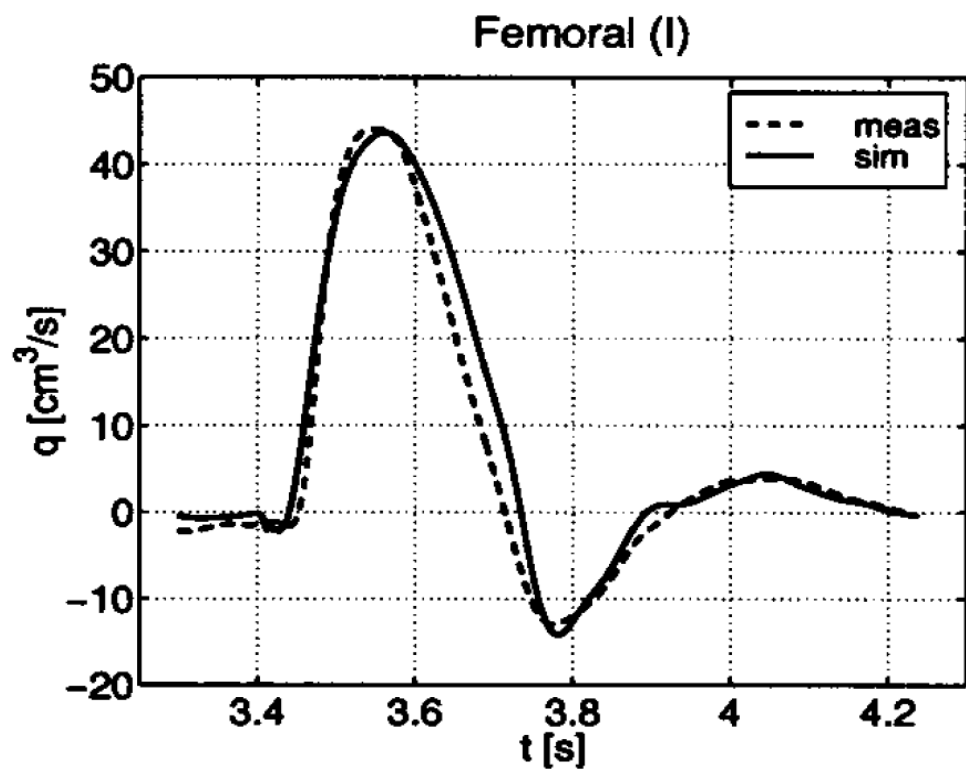
Για την εύρεση της μέσης παροχής Q_m στα αγγεία στην σχετική βιβλιογραφία υπάρχουν τιμές ή διαγράμματα παροχής που θα παρουσιαστούν στις επόμενες εικόνες. Τα διαγράμματα αυτά ψηφιοποιήθηκαν με την εφαρμογή Web Plot Digitizer και επεξεργάστηκαν για την εύρεση της μέσης τιμής με το πρόγραμμα Golden Software Grapher. Τα αποτελέσματα παρουσιάζονται στον Πίνακα 3.2-2.



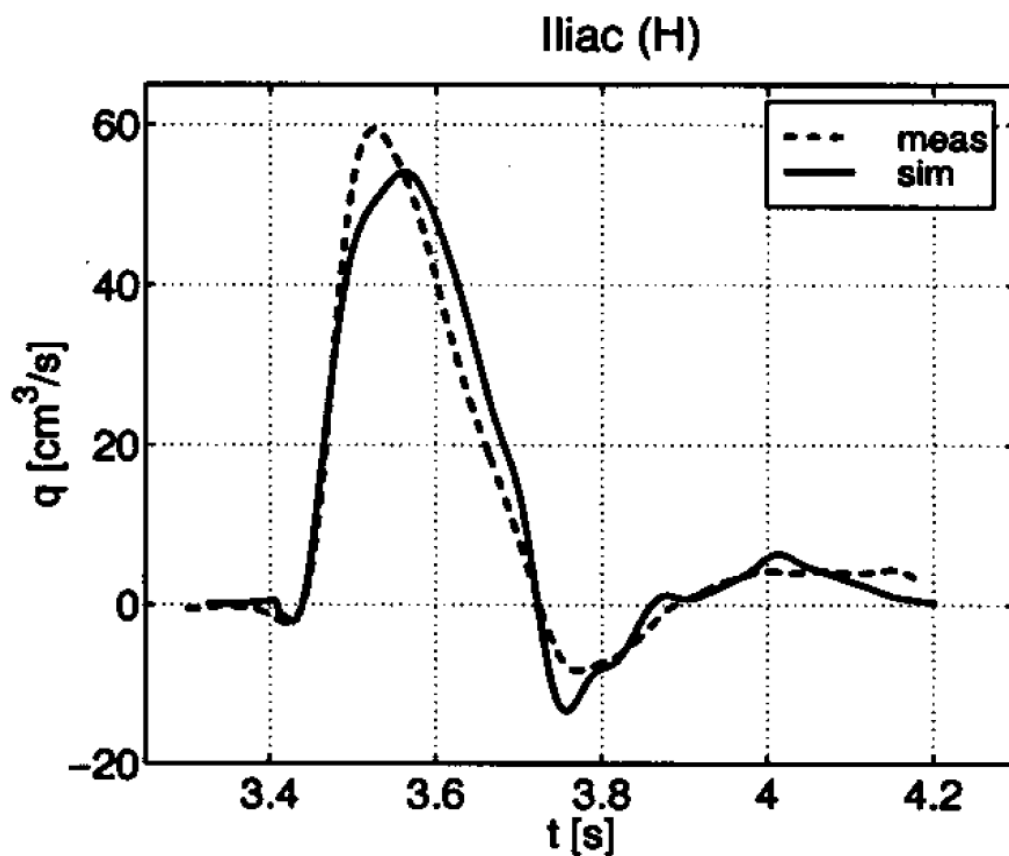
Εικόνα 3.2-1: Παροχή υποκλείδιου αρτηρίας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Olufsen, 2000).



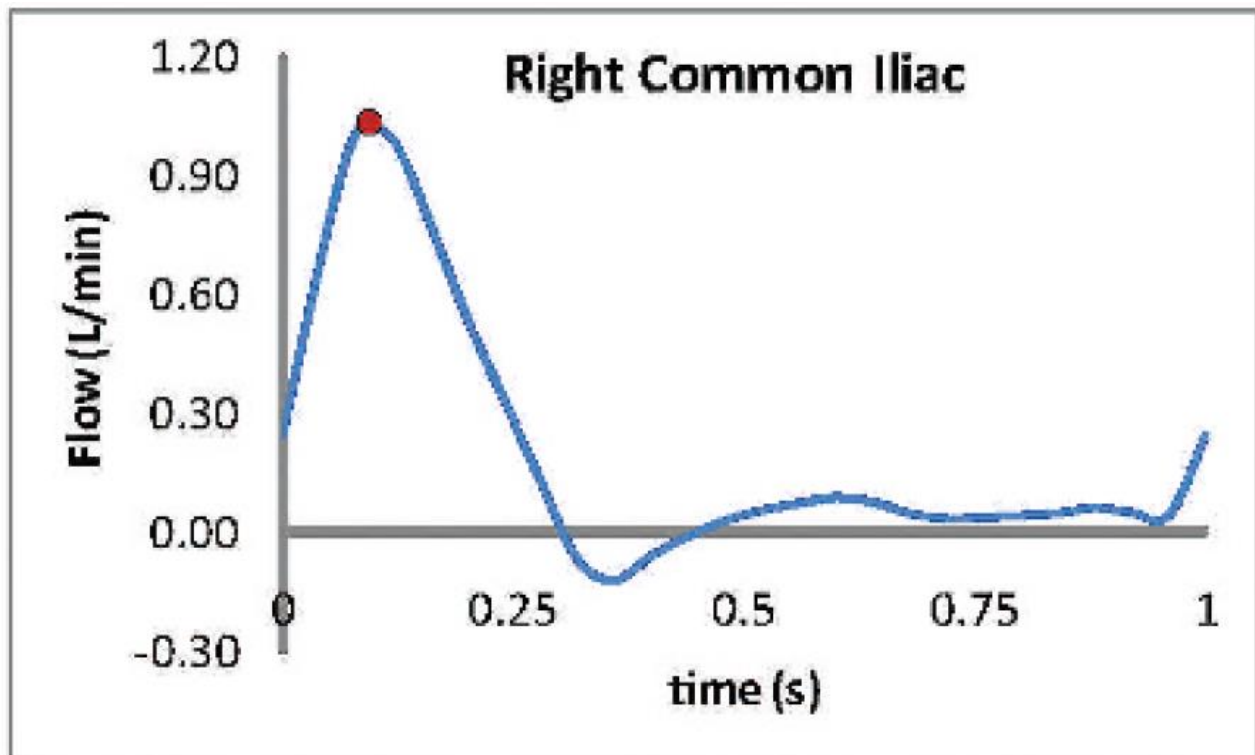
Εικόνα 3.2-2: Παροχή κοινής καρωτίδας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Olufsen, 2000).



Εικόνα 3.2-3: Παροχή μηριαίας αρτηρίας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Olufsen, 2000).

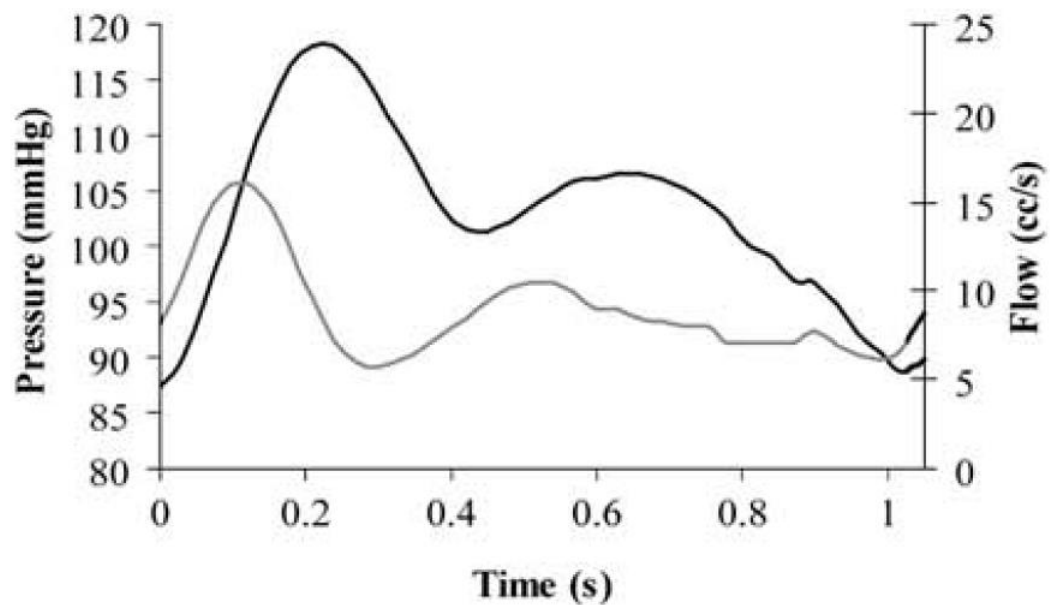


Εικόνα 3.2-4: Παροχή κοινής λαγονίου αρτηρίας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Olufsen, 2000).

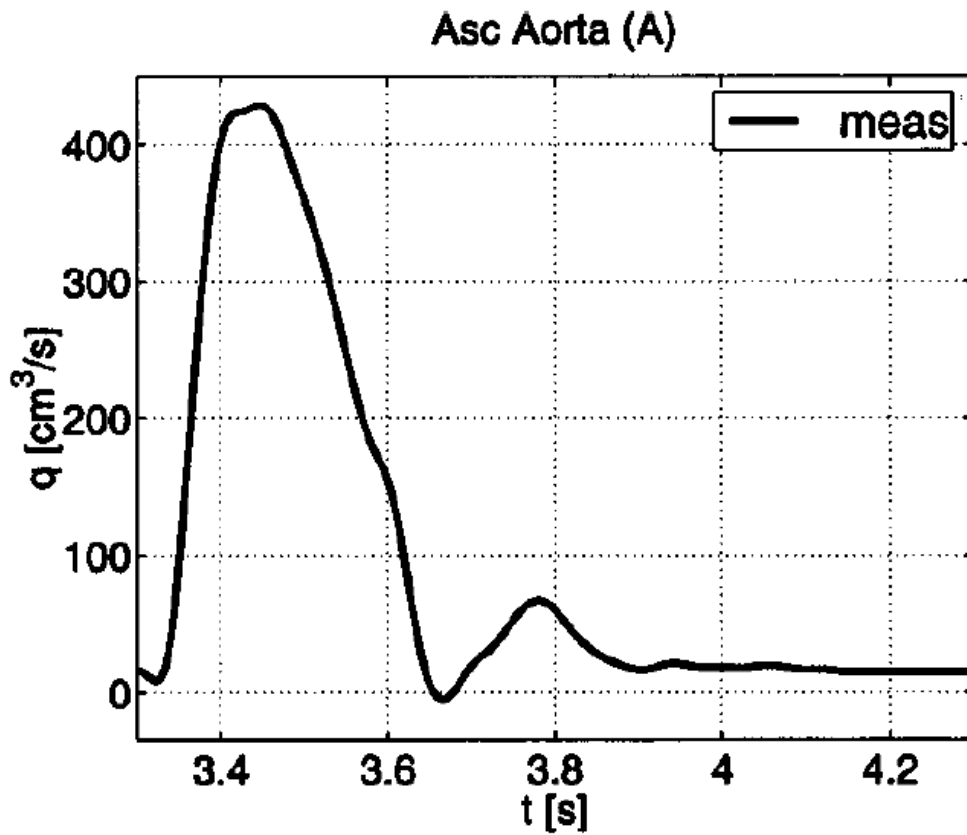


Εικόνα 3.2-5: Παροχή κοινής λαγονίου αρτηρίας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Figueroa, 2009).

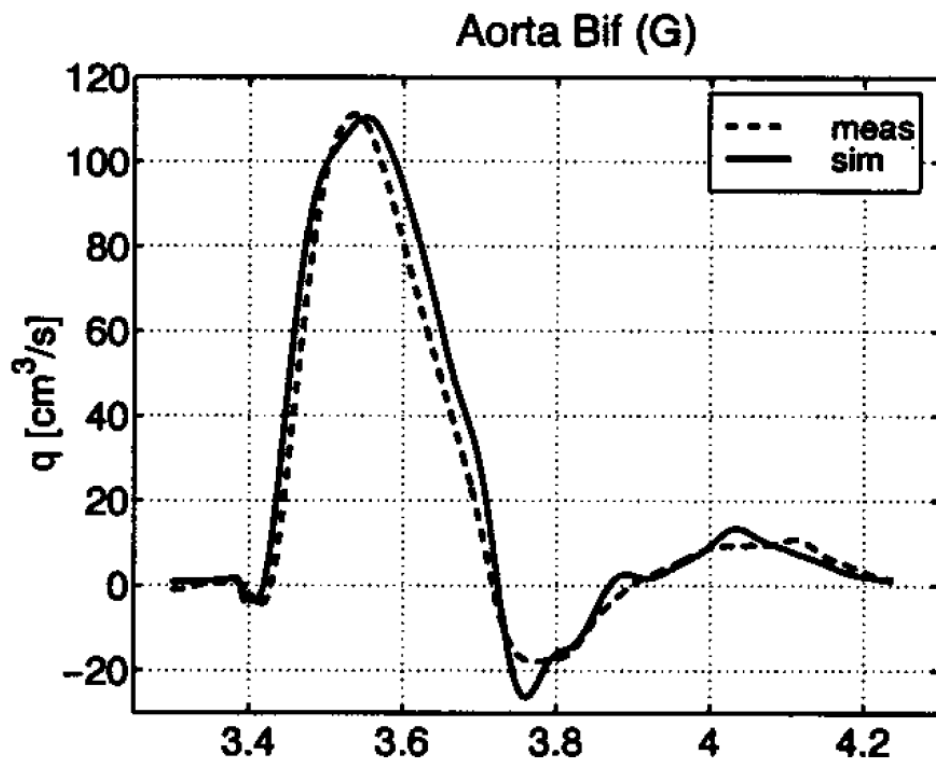
C-Superior Mesenteric



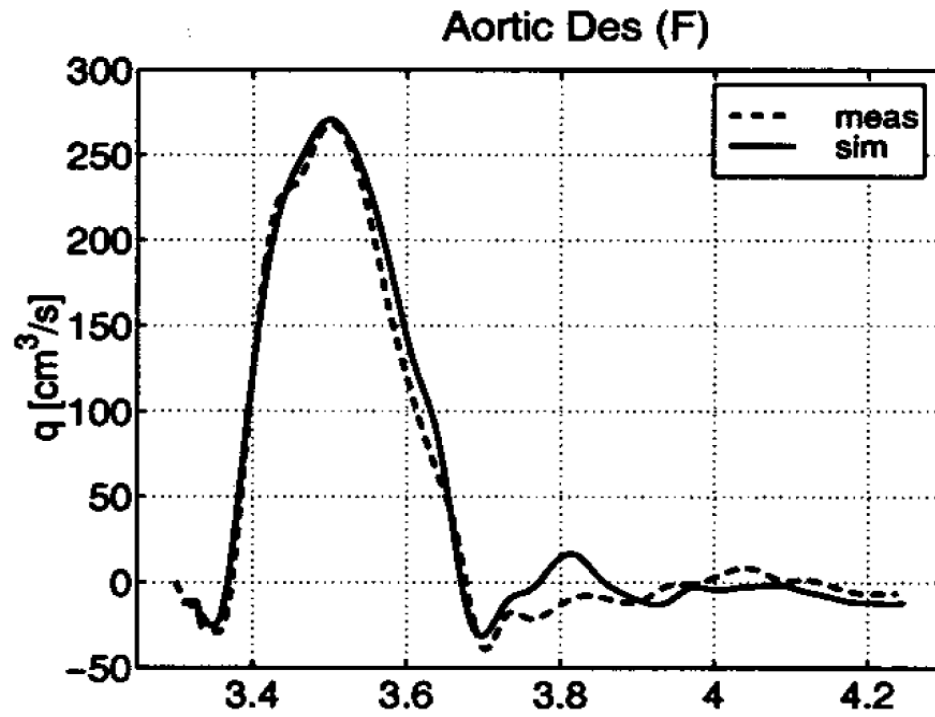
Εικόνα 3.2-6: Παροχή άνω μεσεντερίου αρτηρίας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Vignon-Clementel, 2006).



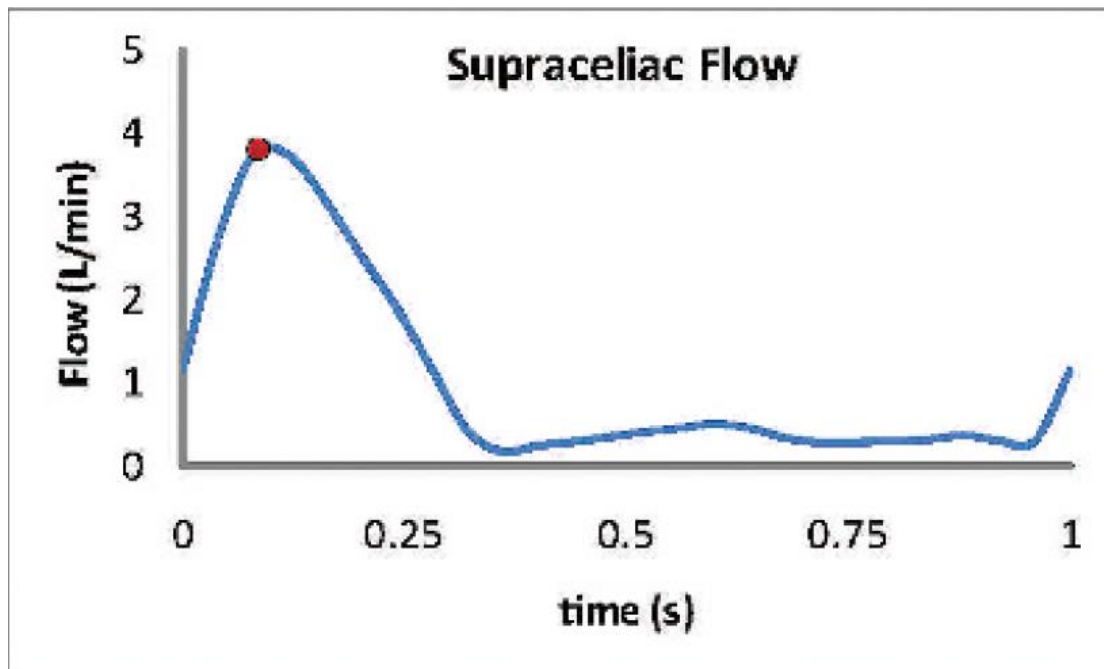
Εικόνα 3.2-7: Παροχή θωρακικής αορτής αρτηρίας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Olufsen, 2000).



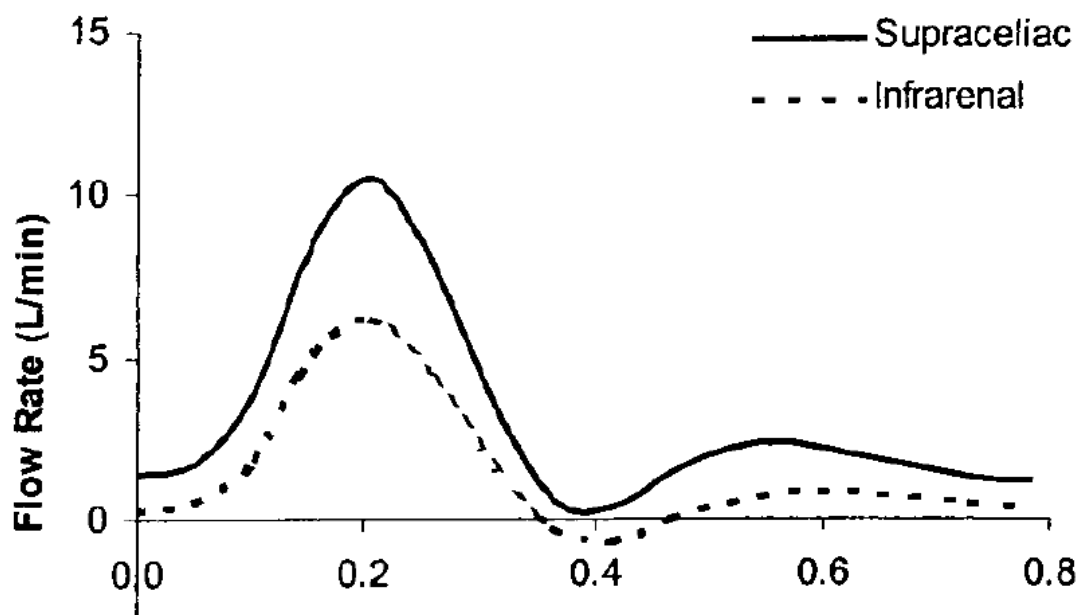
Εικόνα 3.2-8: Παροχή υπονεφρικής αορτής σε ένα καρδιακό κύκλο, (Olufsen, 2000).



Εικόνα 3.2-9: Παροχή κοιλιακής αορτής σε ένα καρδιακό κύκλο, (Olufsen, 2000).



Εικόνα 3.2-10: Παροχή κοιλιακής αορτής αρτηρίας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Figueroa, 2009).



Εικόνα 3.2-11: Παροχή κοιλιακής και υπονεφρικής αορτής αρτηρίας σε ένα καρδιακό κύκλο, (Cheng et al., 2002).

Τα εύρη των αποτελεσμάτων ψηφιοποίησης των παραπάνω διαγραμμάτων και των διαφόρων τιμών που βρίσκονται στην σχετική βιβλιογραφία παρουσιάζονται στο Πίνακα 3.2-2.

Όνομα αρτηρίας	Μέση Παροχή Q_m (ml/s)	Μέγιστη Παροχή Q_{max} (ml/s)	Μέσος Αριθμός Reynolds Re_m	Μέγιστος Αριθμός Reynolds Re_{max}
Υποκλείδιος	7.14	28.38	1273.92	5063.56
Κοινή Καρωτίδα	7.34-7.83	30.54	1529.832	6229.47
Άνω Μεσεντέριος	8.62	24.12	1731.311	8108.59
Κοινή Λαγόνιος	7.5-8.65	58.76	1495.554	10194.8
Μηριαία	5.1-5.2	43.78	1702.843	9203.76
Ανιούσα Αορτή	91.09	422.86	4724.893	21934
Κοιλιακή Αορτή	39.94-56.50	130.51	6076.11	16694.6
Υπονεφρική Αορτή	17.33-27.80	99.74	3338.172	14476.1

Πίνακας 3.2-2: Φυσιολογικές παροχές αίματος και αντίστοιχοι αριθμοί Reynolds βασικών αρτηριών ανθρώπινου σώματος.

Τα παραπάνω αποτελέσματα θα συντελέσουν στην σωστή ρύθμιση της εκκεντρότητας του εμβόλου της πειραματικής διάταξης ώστε να προσομοιωθούν με μεγαλύτερη ακρίβεια τα αιμοδυναμικά μεγέθη στις ανθρώπινες αρτηρίες.

3.2-2: Ενδοτικότητα

Οι τιμές της ενδοτικότητας C στα διάφορα αγγεία λαμβάνονται από τη βιβλιογραφία μέσω του πίνακα της εικόνας 2.5.

Εναλλακτικά η ενδοτικότητα ενός αγγείου μπορεί να υπολογιστεί από τα μεγέθη της ανατομίας και φυσιολογίας του μέσω του ορισμού της διατασιμότητας (ενδοτικότητα ανά μονάδα μήκους) σύμφωνα με την ακόλουθη σχέση (Noordergraaf, 1963):

$$C' = \frac{dS}{dP} = 3S \frac{(a+1)^2}{E(2a+1)} \quad (3.2-1)$$

όπου $S = \pi r^2$ η εγκάρσια κυκλική διατομή του αγγείου, $E = 4 \times 10^6 \text{ gr}/(\text{cm s}^2) = 4 \times 10^5 \text{ Pa} = 0.4 \text{ MPa}$ το μέτρο ελαστικότητας του υλικού του τοιχώματος του αγγείου και $a = r/h$, με r την ακτίνα του αγγείου και h το πάχος του τοιχώματός του. Οπότε,

$$\frac{dS}{dP} = 3S \frac{(a+1)^2}{E(2a+1)} \xrightarrow{(S \equiv A)} \frac{dA}{dP} L = 3LA \frac{(a+1)^2}{E(2a+1)} \xrightarrow{(L \equiv \Delta x)} C = \frac{dV}{dP} = 3\Delta x \pi r^2 \frac{\left[\left(\frac{r}{h}\right)+1\right]^2}{E\left[\left(\frac{2r}{h}\right)+1\right]} \quad (3.2-2)$$

Σύμφωνα με τη **σχέση 3.2-2**, συμπληρώνοντας τα μεγέθη της φυσιολογίας που εμφανίζονται στην σχετική βιβλιογραφία (πίνακας 3.2-3), προκύπτει ο παρακάτω **Πίνακας 3.2-4**

D Indicates that the Segment Is Paired	Notation of Segment	Length of Segment (cm.)	Internal Radius (cm.)	Cross- sectional Area (cm. ²)	Wall- thickness (cm.)		Ω	$10^{-3} H$	$10^{-3} F$
		Δx	r	S		a	R	L	C
	2a	2.0	1.44	6.51	0.158	9.11	0.0415	0.33	51.9
	2b	2.0	1.44	6.51	0.158	9.11	0.0415	0.33	51.9
	3a	2.0	1.17	4.30	0.134	8.73	0.096	0.49	33.2
	3b	3.9	1.17	4.30	0.134	8.73	0.185	0.96	64.4
	4a	5.2	0.98	3.02	0.117	8.40	0.50	1.83	58.5
	4b	5.2	0.98	3.02	0.117	8.40	0.50	1.83	58.5
	4c	5.2	0.98	3.02	0.117	8.40	0.50	1.83	58.5
	5a	5.3	0.85	2.27	0.105	8.05	0.91	2.48	43.2
	5b	5.3	0.85	2.27	0.105	8.05	0.91	2.48	43.2
	5c	5.3	0.85	2.27	0.105	8.05	0.91	2.48	43.2
D	6a	5.8	0.52	0.85	0.076	6.89	7.06	7.23	15.6
D	7a	5.8	0.41	0.53	0.066	6.21	18.2	11.5	8.92
D	7b	2.5	0.41	0.53	0.066	6.21	7.83	5.0	3.86
D	8a	6.3	0.29	0.26	0.056	5.18	82.0	25.0	4.13
D	8b	6.3	0.29	0.26	0.056	5.18	82.0	25.0	4.13
D	8c	1.9	0.29	0.26	0.056	5.18	24.7	7.75	1.24
D	9a	6.1	0.34	0.36	0.060	5.67	40.7	18.0	5.95
D	9b	6.1	0.34	0.36	0.060	5.67	40.7	18.0	5.95
D	9c	6.1	0.34	0.36	0.060	5.67	40.7	18.0	5.95
D	9d	6.1	0.34	0.36	0.060	5.67	40.7	18.0	5.95
D	9e	7.1	0.34	0.36	0.060	5.67	47.5	20.9	6.92
D	10a	6.3	0.28	0.25	0.054	5.19	88.7	26.7	3.99
D	10b	6.3	0.28	0.25	0.054	5.19	88.7	26.7	3.99
D	10c	6.3	0.28	0.25	0.054	5.19	88.7	26.7	3.99
D	11a	6.7	0.20	0.126	0.048	4.17	373.	55.9	1.87
D	11b	6.7	0.20	0.126	0.048	4.17	373.	55.9	1.87
D	11c	6.7	0.20	0.126	0.048	4.17	373.	55.9	1.87
D	11d	6.7	0.20	0.126	0.048	4.17	373.	55.9	1.87
D	11e	5.3	0.20	0.126	0.048	4.17	294.	44.2	1.48
D	12a	7.5	0.13	0.053	0.041	3.17	2350.	149.	0.715
D	12b	7.5	0.13	0.053	0.041	3.17	2350.	149.	0.715
D	12c	7.5	0.13	0.053	0.041	3.17	2350.	149.	0.715
D	12d	7.5	0.13	0.053	0.041	3.17	2350.	149.	0.715
D	12e	4.3	0.13	0.053	0.041	3.17	1350.	85.0	0.410
	13a	3.4	0.62	1.21	0.085	7.29	2.05	2.98	13.6
	14a	3.4	0.43	0.58	0.068	6.32	8.90	6.21	5.80
D	14b	6.8	0.43	0.58	0.068	6.32	17.6	12.4	11.6
D	15a	6.1	0.34	0.36	0.060	5.67	40.7	18.0	5.95
D	15b	5.6	0.34	0.36	0.060	5.67	37.4	16.5	5.46
D	16a	6.3	0.27	0.23	0.053	5.09	105.	29.0	3.61
D	16b	6.3	0.27	0.23	0.053	5.09	105.	29.0	3.61
D	16c	6.3	0.27	0.23	0.053	5.09	105.	29.0	3.61
D	16d	4.6	0.27	0.23	0.053	5.09	76.5	21.2	2.64
D	17a	6.7	0.20	0.13	0.048	4.17	373.	55.9	1.87
D	17b	6.7	0.20	0.13	0.048	4.17	373.	55.9	1.87
D	17c	6.7	0.20	0.13	0.048	4.17	373.	55.9	1.87
D	17d	3.7	0.20	0.13	0.048	4.17	205.	30.8	1.03
D	18a	7.1	0.16	0.08	0.043	3.72	976.	94.1	1.13
D	18b	7.1	0.16	0.08	0.043	3.72	976.	94.1	1.13
D	18c	7.1	0.16	0.08	0.043	3.72	976.	94.1	1.13
D	18d	2.2	0.16	0.08	0.043	3.72	303.	29.2	0.349
D	19a	7.9	0.11	0.04	0.040	2.75	4340.	218.	0.488
D	19b	4.3	0.11	0.04	0.040	2.75	2360.	119.	0.266
	20a	1.0	0.39	0.48	0.064	6.09	3.82	2.21	1.37
	21a	7.1	0.18	0.10	0.045	3.89	625.	75.3	1.45
	22a	6.3	0.27	0.23	0.053	5.09	105.	29.0	3.61
	23a	6.6	0.23	0.17	0.050	4.60	201.	41.2	2.58
D	24a	3.2	0.26	0.21	0.053	4.91	63.9	16.2	1.62
	25Aa	5.9	0.43	0.58	0.068	6.32	15.4	10.8	10.1
	25Ba	5.0	0.16	0.08	0.043	3.72	687.	66.3	0.792
	26Aa	5.9	0.39	0.48	0.064	6.09	22.5	13.0	8.10
	26Ab	5.9	0.39	0.48	0.064	6.09	22.5	13.0	8.10
	26Ac	5.9	0.39	0.48	0.064	6.09	22.5	13.0	8.10
	26Ad	3.1	0.39	0.48	0.064	6.09	11.8	6.85	4.26
	26Ba	5.9	0.39	0.48	0.064	6.09	22.5	13.0	8.10
	26Bb	5.9	0.39	0.48	0.064	6.09	22.5	13.0	8.10
	26Bc	5.9	0.39	0.48	0.064	6.09	22.5	13.0	8.10
D	27a	7.1	0.18	0.10	0.046	3.91	625.	74.6	1.46
D	27b	7.7	0.18	0.10	0.046	3.91	678.	80.8	1.58

Πίνακας 3.2-3: Πίνακας γεωμετρικών στοιχείων και ενδοτικότητας ανά αγγείο (Noordergraaf, 1963)

Όνομα Αγγείου	Ενδοτικότητα C ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{ s}^2 / \text{kg}$) (Stergiopoulos 1992)	Ενδοτικότητα C ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{ s}^2 / \text{kg}$) (Σχέση 3.2-2)
Υποκλείδιος	33,870	17,46425
Κοινή Καρωτίδα	21,360	24,20488
Άνω Μεσεντέριος	10,400	10,10187
Έξω Λαγόνιος	15,620	15,47607
Μηριαία	13,640	29,93683
Ανιούσα Αορτή	104,400	110,2748
Θωρακική Αορτή	59,700	58,27168
Υπονεφρική Αορτή	20,400	43,41753

Πίνακας 3.2-4: Ενδοτικότητα C εξεταζόμενων αγγείων.

Με βάση τον παραπάνω πίνακα το δοχείο Windkessel της διάταξης (βλ. κεφ. 4) θα πληρωθεί ώστε να καλυφθούν αυτές οι τιμές για βέλτιστη προσομοίωση.

3.2-3: Συχνότητα παλμών καρδιάς

Σύμφωνα με την βιβλιογραφία οι παλμοί της καρδιάς κυμαίνονται από 70-115 παλμούς το λεπτό (bpm), επηρεαζόμενοι από ποικίλους παράγοντες, όπως το φύλο η ηλικία και το βάρος, καθώς και εάν ο άνθρωπος ασκείται ή ξεκουράζεται.

Κατά την διάρκεια του ύπνου ο ρυθμός των παλμών μειώνεται σημαντικά φτάνοντας μέχρι και τα 30 bpm. Ακολουθούν σχετικοί πίνακες.

Table I. Gender averages for hemodynamic quantities

	Men (n = 6)	Women (n = 5)	Statistical difference
Age (y)	22.3 ± 1.4	25.2 ± 2.2	–
Height (m)	1.74 ± 0.08	1.73 ± 0.05	–
Weight (kg)	71.1 ± 9.3	60.4 ± 9.0	P < .05
BMI (kg/m ²)	23.6 ± 2.3	20.2 ± 2.1	P < .05
Heart rate (bpm)			
Rest	71 ± 6	75 ± 6	–
Exercise	107 ± 9	111 ± 9	–
Flow rate (L/min)			
Rest-SC	3.0 ± 0.6	2.8 ± 0.7	–
Exercise-SC	7.6 ± 1.4	6.7 ± 1.3	–
Rest-IR	0.9 ± 0.4	0.8 ± 0.4	–
Exercise-IR	5.9 ± 1.3	5.2 ± 0.8	–
Wall shear stress (dynes/cm ²)			
Rest-SC	3.6 ± 0.9	3.4 ± 0.7	–
Exercise-SC	7.2 ± 0.5	6.1 ± 0.4	–
Rest-IR	1.2 ± 0.5	1.4 ± 0.7	–
Exercise-IR	5.1 ± 0.8	5.4 ± 2.1	–
OFI			
Rest-SC	0.01 (0.00-0.06)	0.00 (all 0.00)	–
Exercise-SC	0.00 (all 0.00)	0.00 (all 0.00)	–
Rest-IR	0.12 (0.06-0.27)	0.10 (0.00-0.22)	–
Exercise-IR	0.00 (all 0.00)	0.00 (all 0.00)	–
OSI			
Rest-SC	0.01 (0.00-0.03)	0.01 (0.00-0.03)	–
Exercise-SC	0.00 (all 0.00)	0.03 (0.00-0.09)	–
Rest-IR	0.14 (0.06-0.25)	0.12 (0.00-0.26)	–
Exercise-IR	0.01 (0.00-0.02)	0.00 (all 0.00)	–

Gender averages of age, height, weight, BMI, rest and exercise heart rates, and rest and exercise blood flow rate, wall shear stress, OFI, and OSI at supraceliac and infrarenal levels of abdominal aorta. Data are presented as average ± standard deviation except for OFI and OSI, which are presented as average (range). Men had significantly higher weights and BMIs as compared with women. No statistical differences were seen in any of hemodynamic quantities between men and women. P value < .05 indicates statistically significant difference between male and female sample groups. SC, Supraceliac; IR, infrarenal.

Πίνακας 3.2-5: Ανθρώπινοι παλμοί καρδιάς σε ξεκούραση και άσκηση (Cheng,Hitchens,Taylor, 2002)

TABLE 1. *Pooled data, all subjects (N = 12); all intervals (N = 300 for each stage)*

	Subj. Nights	EEG Stage				
		I-REM	P diff.*	II-REM	P diff.*	III-IV-REM
Systolic blood press.	30	114.89±22.82	< .001	110.92±20.32	< .05	109.40±20.64
Systolic blood press. d		4.93±2.82	< .01	3.27±1.63	NS	2.82±1.25
Respiratory rate	36	8.05±2.45	< .001	7.50±2.26	< .001	7.85±2.26
Respiratory rate d		.96±.37	< .001	.62±.19	NS	.55±.26
Pulse rate	34	30.86±10.78	< .001	28.97±8.18	< .001	29.76±8.42
Pulse rate d		1.56±.71	< .001	1.01±.51	NS	.87±.36

Values are means \pm 2 SD. * Significance of difference of means by the Scheffé multiple comparison technique for paired observations. d is the measure of variability employed (see text).

Πίνακας 3.2-6: Ανθρώπινοι παλμοί καρδιάς σε διάφορες καταστάσεις ύπνου (Snyder, 1964)

Με βάση αυτές τις τιμές ρυθμίζονται οι στροφές n του κινητήρα της διάταξης (βλ. κεφ.4)

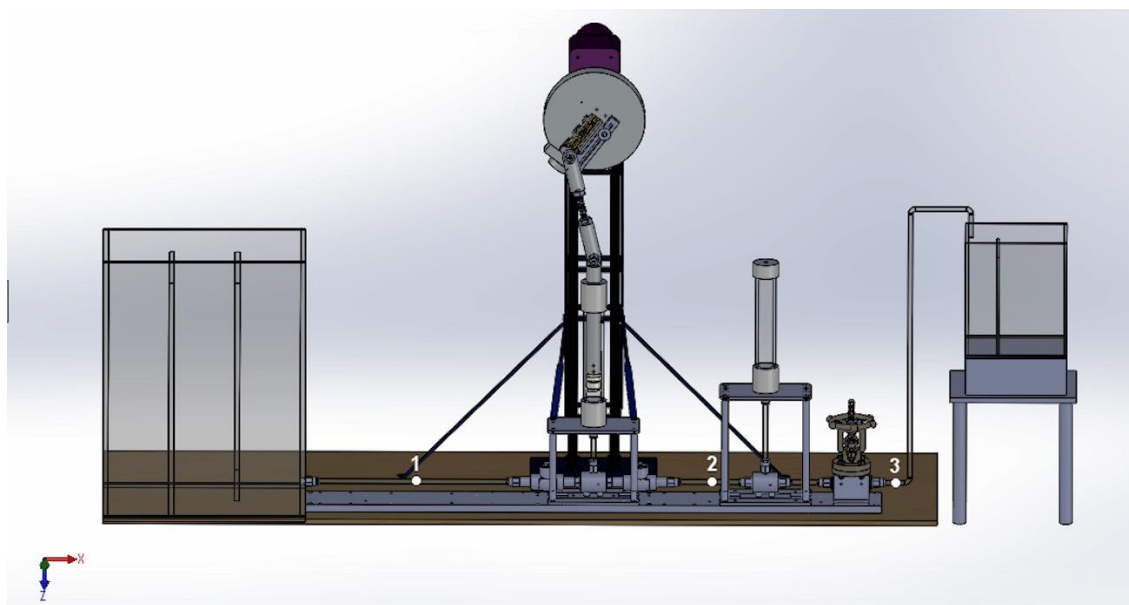
Οι τιμές που υπολογίστηκαν σε αυτό το κεφάλαιο είναι η βάση, σύμφωνα με την οποία θα γίνουν οι ρυθμίσεις των παραμέτρων της διάταξης, οι οποίες θα αναλυθούν στο κεφάλαιο 5.1 (Πειραματική Διαδικασία)

Κεφάλαιο 4: Περιγραφή πειραματικής διάταξης

Οι πειραματικές μετρήσεις που περιγράφονται στα επόμενα κεφάλαια πραγματοποιήθηκαν με χρήση διάταξης που προσομοιώνει τη λειτουργία του καρδιαγγειακού συστήματος. Σε αυτό το κεφάλαιο περιγράφεται η διάταξη αυτή, καθώς και οι αντιστοιχίες που έχουν τα μέρη της με τις λειτουργίες του καρδιαγγειακού συστήματος και τα φυσικά μεγέθη που το διέπουν. Επίσης περιγράφονται τα διάφορα μετρητικά όργανα που χρησιμοποιήθηκαν κατά τη διάρκεια των μετρήσεων

4.1 : Πειραματική διάταξη

Η πειραματική διάταξη αποτελεί έναν μηχανισμό προσομοίωσης του καρδιαγγειακού συστήματος, ικανό να παραλλάξει διάφορες παραμέτρους, ώστε να επιτυγχάνεται προσομοίωση διάφορων καταστάσεων, παθήσεων και προβλημάτων της καρδιαγγειακής λειτουργίας. Η πλήρης διάταξη παρουσιάζεται στο **Σχήμα 4.1.** και ακολουθεί περιγραφή των επιμέρους στοιχείων της διάταξης, όπως φαίνονται από τα αριστερά προς τα δεξιά του σχήματος.



Σχήμα 4.1: Σχέδιο της πλήρους πειραματικής διάταξης προσομοίωσης καρδιαγγειακής λειτουργίας όπου διακρίνονται οι τρεις θέσεις μέτρησης της πίεσης.

4.1-1: Πρώτο δοχείο συγκέντρωσης νερού (Δοχείο τροφοδοσίας).

Σκοπός του δοχείου αυτού είναι η επαρκής τροφοδοσία της διάταξης με νερό και η διατήρηση μίας σταθερής στάθμης λειτουργίας. Το δοχείο είναι κατασκευασμένο από Plexiglas και χωρίζεται σε τρεις ίσους μικρότερους χώρους (Χώροι A,B,C), οι διαστάσεις των οποίων είναι οι ακόλουθες:

Εξωτερικές διαστάσεις δοχείου	400 X 250 X 530 mm ³
Εσωτερικές διαστάσεις δοχείου	360 X 230 X 520 mm ³
Εσωτερικές διαστάσεις χώρων A,B,C	120 X 230 X 475 mm ³

Οι χώροι Β,Γ επικοινωνούν μεταξύ τους και με την υπόλοιπη διάταξη ενώ ο χώρος Α είναι αποκομμένος και υπερχειλίζει στο υπόλοιπο δοχείο. Στον χώρο Α τοποθετείται μία φυγοκεντρική αντλία (σεντρίνα), συνδεδεμένη με ένα ποτενσιόμετρο και ένα τροφοδοτικό (**Φωτογραφίες 4.1-1, 4.1-2**) ώστε να υπάρχει συνεχής παροχή στους χώρους Β,Γ και στη συνέχεια στην υπόλοιπη διάταξη.



Φωτογραφία 4.1-1: Φυγοκεντρική αντλία τοποθετημένη στον χώρο Α.



Φωτογραφία 4.1-2: Τροφοδοτικό και ποτενσιόμετρο φυγοκεντρικής αντλίας.

Ακολουθούν τα χαρακτηριστικά της αντλίας, του τροφοδοτικού και του ποτενσιόμετρου σύμφωνα με τους κατασκευαστές

Σεντρίνα (Κατασκευή TMC)

Type	Power source	Deliver Volume	Outlet Diameter	Current	Deliver Head	Dimensions
Caravan Pump	DC 12V	160GPH~10lt/min	11/32"	2.5A	15ft	(LxWxH) 54.5x54.5x105mm

Τροφοδοτικό (Κατασκευή Amarad)

Type	Input	Output
DF 1762S	230V AC	12 V DC 5-7 A

Ποτενσιόμετρο (Κατασκευή Amarad)

Type	Voltage/Power
Dimmer d 500	12V DC / 100 W 24V DC/200 W

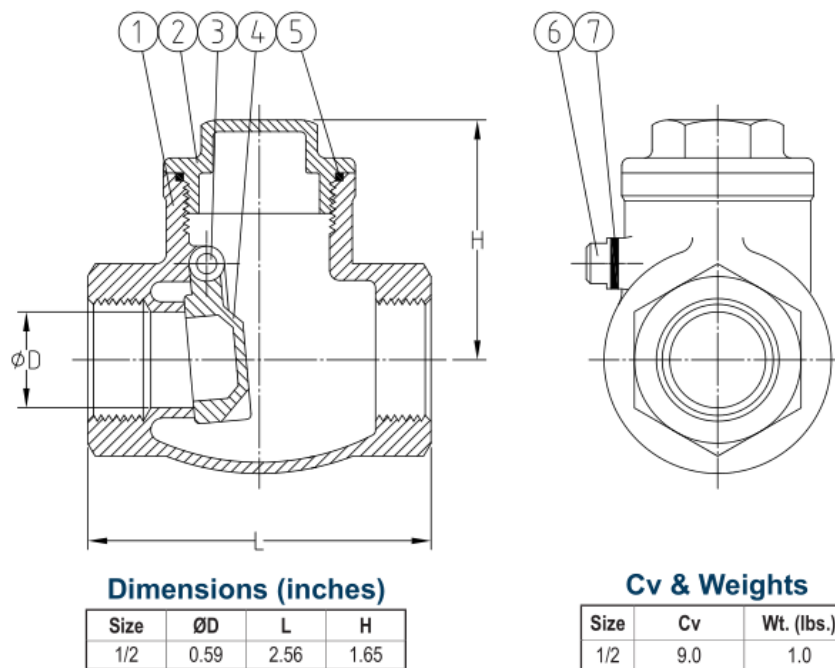
4.1-2: Βάνες Αντεπιστροφής

Οι βάνες αντεπιστροφής προσομοιώνουν τις βαλβίδες της καρδιάς και ορίζουν την κατεύθυνση της ροής. Για την εξυπηρέτηση της προσομοίωσης του καρδιαγγειακού συστήματος αγοράστηκαν από το εμπόριο δυο βάνες αντεπιστροφής (check valves) της Εταιρείας FNW. Τα χαρακτηριστικά των βανών αντεπιστροφής φαίνονται στην **Εικόνα 4.1-3**.

FNW™

Figure 16B-200
STAINLESS STEEL CHECK VALVES

200 WOG SWING CHECK VALVE

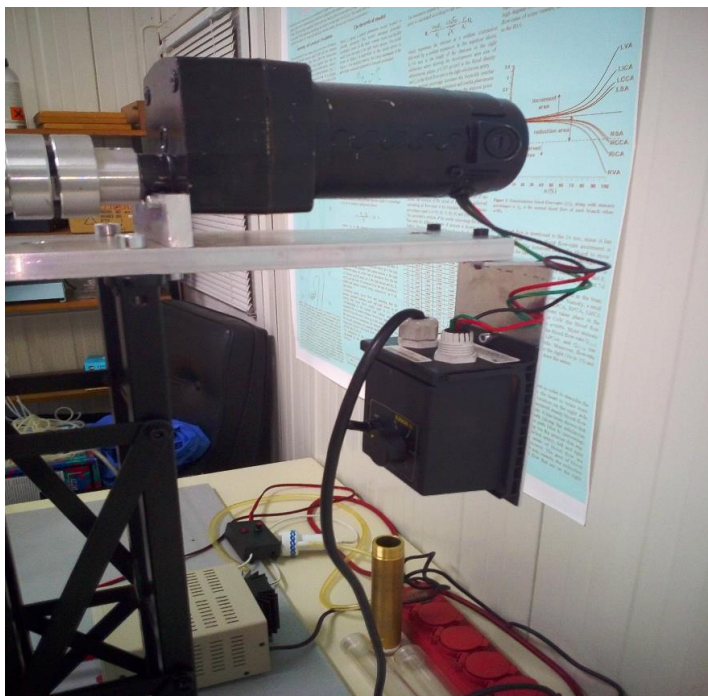


Εικόνα 4.1-3: Βάνες αντεπιστροφής (check valves)

4.1-3: Κινητήρας, στρόφαλος και έμβολο

Για την άντληση και την κυκλοφορία του νερού στη διάταξη, την προσομοίωση δηλαδή της καρδιακής λειτουργίας, χρησιμοποιείται αντλία πιστονιού. Η αντλία αυτή αποτελείται από έμβολο συνδεδεμένο με στρόφαλο κινούμενο από ηλεκτροκινητήρα. Η διάταξη έχει την δυνατότητα για ρύθμιση των στροφών του κινητήρα (μέσω Controller) αλλά και ρύθμιση του όγκου εμβολισμού με μεταβολή του μήκους διαδρομής και πλάτους ταλάντωσης του εμβόλου με ατέρμονα κοχλία.

Ο κινητήρας του συστήματος είναι μοντέλο της Εταιρείας LEESON τύπου Permanent magnet DC Gearmotors. Ο κινητήρας καταναλώνει DC ρεύμα. Για την ρύθμιση των στροφών του συνδέεται με ένα Controller της Εταιρείας DART. Ο κινητήρας και το Controller σε σύνδεση φαίνονται στην **Φωτογραφία 4.1-4**.



Φωτογραφία 4.1-4: Κινητήρας και Controller σε σύνδεση

Τα χαρακτηριστικά του κινητήρα και του Controller παρμένα από το site των εταιριών φαίνονται παρακάτω.

Κινητήρας

RPM	60	Volts	180	Volts	
HPKW	1/17	F.L. Amps	0.36	F.L. Amps	
Frame	30	S. F Amps		S. F Amps	
Max Amb	40	Hertz		Phase	
Insul Class	F3	Duty	CONT	TYPE	DN
Model #	985.634 E	Serv. Factor	1.0	PF	
Eff 100%		Eff 75%		Enclosure	TENV
Protection	NOT	Therm.Prot.		Bearing OPE	
Design		Code		Bearing PE	
UL	Yes	CSA	Yes	CE	Yes
Torque lb-In	56	Nameplate	M1125036.00	Lubrication	
Series	PZ	Overhung Ld.	171	Shaft Type	PARALLEL

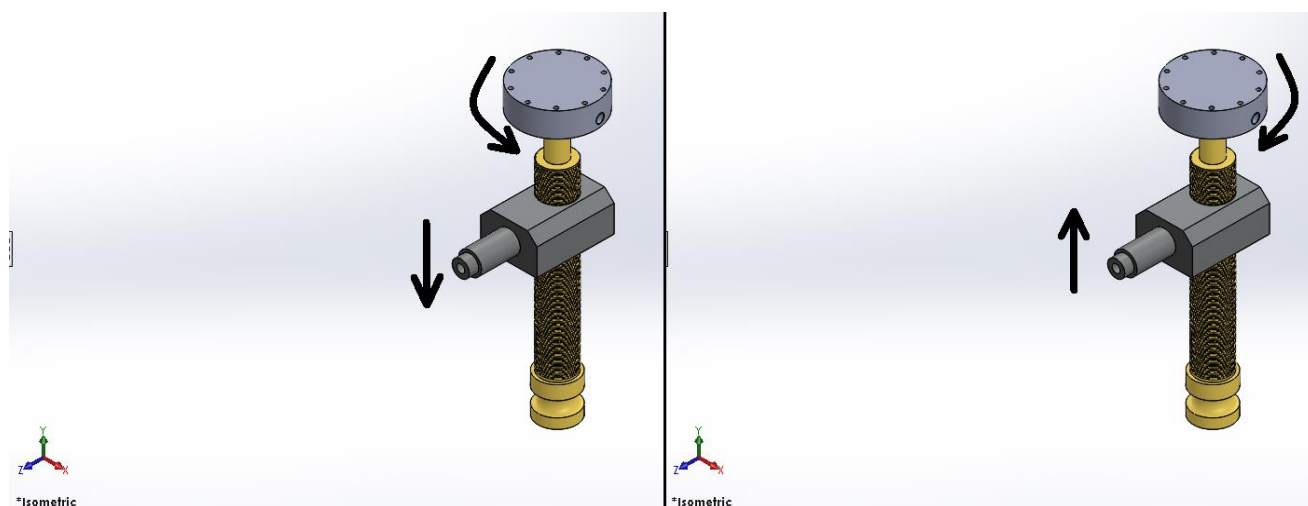
Controller

Model	DC Output Current	Input	Output
15DVE	3 Amps	120/240 VAC	0-90/180 VDC

Ο στρόφαλος ή αλλιώς τύμπανο είναι ο μηχανισμός εκείνος που ουσιαστικά μετατρέπει την περιστροφική κίνηση σε γραμμική παλινδρομική ούτως ώστε να γίνεται η άντληση από την αντλία πιστονιού. Τα χαρακτηριστικά του στρόφαλου είναι αυτά που καθορίζουν το μήκος της διαδρομής της παλινδρομικής κίνησης ανάλογα με τον τρόπο σύνδεσης του με τα λοιπά μέρη μετάδοσης της ισχύος διωστήρες, έμβολο κλπ. Το μήκος της διαδρομής στην συνέχεια καθορίζει όπως θα δούμε τον όγκο εμβολισμού V_e ανά έναν πλήρη εμβολισμό, στο σύστημα, μέγεθος που αντιπροσωπεύει βιολογικά ανάλογα παροχής ανά παλμό του αντίστοιχου κυκλοφορικού που προσομοιώνεται.

Για την δημιουργία δυνατότητας αναπαράστασης διάφορων κυκλοφορικών συστημάτων, με διάφορες τιμές όγκων εμβολισμού, ο στρόφαλος έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να μπορεί να μεταβάλλει το μήκος διαδρομής του εμβόλου, μέσω ενός μηχανισμού, μεταβάλλοντας το σημείο άρθρωσης του πρώτου διωστήρα με τον στρόφαλο.

Αυτό το επιτυγχάνει μέσω μιας βίδας δρομέα (ατέρμων κοχλίας) όπου κατά την περιστροφή του μεταβάλλει την θέση της κορώνας ατέρμονος κοχλία στην οποία βρίσκεται το σημείο άρθρωσης του διωστήρα με τον στρόφαλο. Ο ατέρμων κοχλίας και η κορώνα ατέρμονος κοχλία ακολουθούν τον μηχανισμό του κοχλίας **Εικόνα 4.1-5**. Ο ατέρμων κοχλίας είναι σχεδιασμένος έτσι ώστε με μια πλήρη περιστροφή του να μεταβάλλει το σημείο άρθρωσης του διωστήρα με τον στρόφαλο κατά 1 mm. Η ακρίβεια στην περιστροφή του ατέρμονος κοχλίας επιτυγχάνεται μέσω του μετρητή βήματος ο οποίος έχει σχεδιαστεί κατάλληλα ώστε να δίνει 10 υποδιαίρεσεις του βήματος του ατέρμονος κοχλίας. Ακόμα, η θέση του σημείου άρθρωσης είναι συνεχώς ορατή μέσω κατάλληλης βαθμονόμησης επάνω στο στρόφαλο. Η σταθεροποίηση και πάκτωση της θέσης της κορώνας ατέρμονος κοχλίας επιτυγχάνεται μέσω του σφιγκτήρα έτσι ώστε κατά την λειτουργία να αποφεύγονται οι αθέμιτες μετατοπίσεις και οι κραδασμοί από την ελλιπή πρόσδεση.



Εικόνα 4.1-5: Μηχανισμός μεταβολής του μήκους διαδρομής

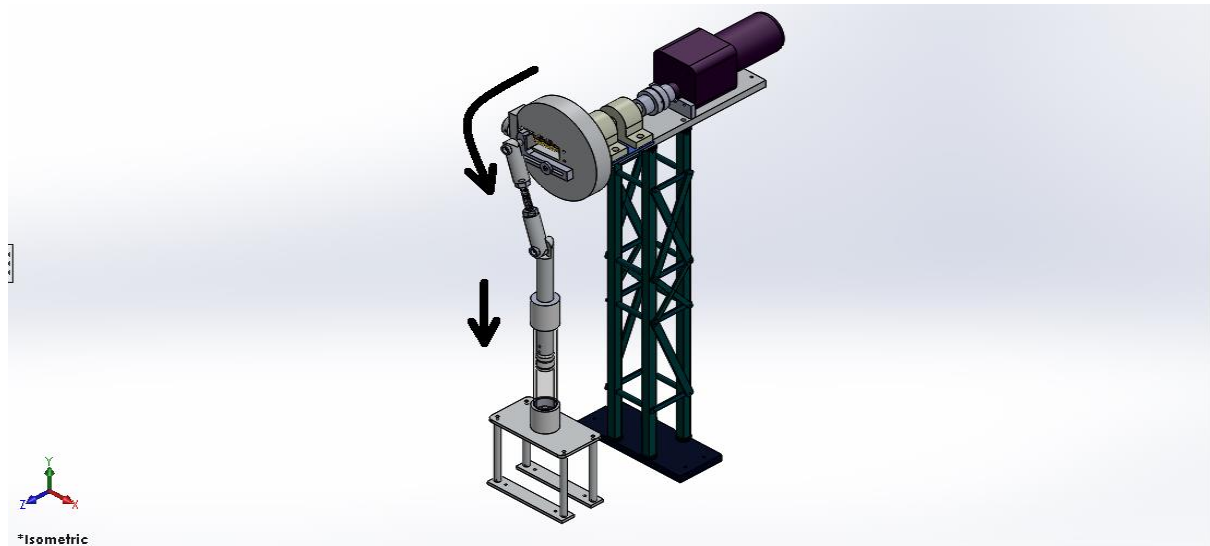
Οι διωστήρες ενός στρόφαλου είναι υπεύθυνοι για την μεταφορά της δύναμης που αναπτύσσεται κατά την περιστροφή του στρόφαλου μέσω του κινητήρα. Λόγω των διαστάσεων του δοχείου εμβολισμού και της διαδρομής του εμβόλου, στον παρόντα μηχανισμό χρησιμοποιούνται δυο διωστήρες, ένας σταθερός σε πάκτωση με το έμβολο, όπου εκτελεί ευθύγραμμη παλινδρομική κίνηση (χρησιμοποιείται δηλαδή ως προέκταση του εμβόλου), και ένας διωστήρας όπου εκτελεί αιώρηση, το άνω άκρο του σε άρθρωση με τον

στρόφαλο εκτελεί περιστροφική κίνηση ενώ το κάτω άκρο του σε άρθρωση με τον πρώτο διωστήρα εκτελεί ευθύγραμμη (παλινδρομική) κίνηση.

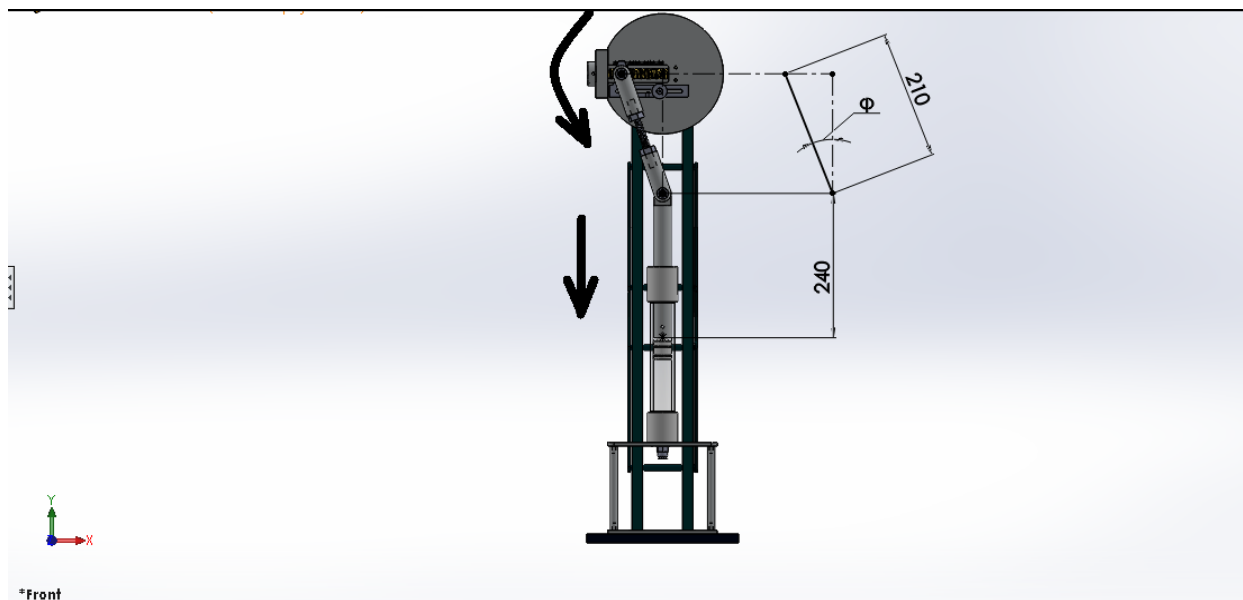
Ο πρώτος διωστήρας λόγω των διατάσεων του δοχείο εμβολισμού έχει ενεργό μήκος (δηλαδή το μήκος από την άρθρωση έως την πάκτωση με το έμβολο) 240 mm.

Ο δεύτερος διωστήρας σχεδιάστηκε να έχει ενεργό μήκος (δηλαδή το μήκος από άρθρωση σε άρθρωση) 210 mm με δυνατότητα αυξομείωσης.

Το μήκος αυτό υπολογίστηκε στην λογική της μείωσης της μέγιστης γωνίας ϕ που σχηματίζεται στην θέση του στροφάλου 90° από το Α.Ν.Σ., για την αποφυγή μεγάλων τιμών των δυνάμεων οριζόντιας συνιστώσας, και κατά συνέπεια την καλύτερη μεταφορά της ισχύος από τους διωστήρες **Εικόνα 4.1-6, Εικόνα 4.1-7.**



Εικόνα 4.1-6: Αναπαράσταση κίνησης διωστήρων



Εικόνα 4.1-7: Γωνία διωστήρων

Το έμβολο είναι κατασκευασμένο από σκληρό πλαστικό acetal. Για το ζήτημα της στεγανότητας χρησιμοποιούνται δυο φλάντζες δακτύλιοι από καουτσούκ. Το έμβολο προσδένεται στον πρώτο διωστήρα με δύο πείρους σύσφιξης.

Το δοχείο εμβόλου είναι ο χώρος όπου εκτελείται ο εμβολισμός του νερού στο σύστημα. Το μέγεθος του προσαρμόζεται έτσι ώστε να εξυπηρετεί το επιθυμητό μέγιστο μέγεθος διαδρομής του εμβόλου. Η κατάληξη του δοχείου έχει σχεδιαστεί έτσι ώστε εσωτερικά να δημιουργεί κωνική μείωση από την διατομή του δοχείου στην διατομή της σωλήνωσης για την ομαλότερη μετάβαση του ρευστού. Τα καπάκια του δοχείου προσδένονται βιδωτά στον κύλινδρο και για την στεγανοποίηση χρησιμοποιείται teflon στις συνδέσεις. Το υλικό κατασκευής του κυλίνδρου επιλέχθηκε να είναι διαφανές Plexiglas ώστε να γίνεται ορατή η ύπαρξη αέρα κατά τον εμβολισμό μέσα στο σύστημα.

Το δοχείο εμβόλου πριν από την λειτουργία του συστήματος εμπεριέχει εγκλωβισμένο αέρα ο οποίος απαιτείται να αφαιρεθεί. Για αυτό τον σκοπό τοποθετείται μια βάνα αέρος διατομής $\varnothing 3$ στο μέγιστο δυνατό άνω νεκρό σημείο του εμβολισμού.

4.1-4: Δοχείο ενδοτικότητας

Η ενδοτικότητα των αγγείων μπορεί να εκφραστεί μηχανικά στα πρότυπα Windkessel με την βοήθεια ενός δοχείου το οποίο είναι κλειστό και περιέχει ποσότητα αέρα.

Οι διαστάσεις του δοχείου και η ποσότητα του αέρα που περιέχεται στο δοχείο καθορίζουν την αντίστοιχη τιμή της ενδοτικότητας που αναπαρίσταται και κατά συνέπεια το εύρος των αγγείων που προσομοιώνονται.

Στην περίπτωση αυτού του πειράματος, το δοχείο ενδοτικότητας έχει κατασκευασθεί με γνώμονα την αναλογία του ύψους με το πλάτος του να είναι τέτοια ώστε να γίνεται ορατή η μεταβολή της στάθμης του νερού μέσα στο δοχείο κατά την λειτουργία του συστήματος.

Το δοχείο έχει γενικές εξωτερικές διαστάσεις 50 X 262 mm και εσωτερικές αξιοποιήσιμες για την ενδοτικότητα 30 X 220 mm. Αποτελείται από τρία μέρη:

1. Άνω καπάκι, υλικό κατασκευής πλαστικό πολυακετάλης (ACETAL)
2. Κύλινδρος δοχείου, υλικό κατασκευής Plexiglas
3. Κάτω καπάκι, υλικό κατασκευής σκληρό αλουμίνιο

Στο άνω καπάκι δημιουργείται υποδοχή για μια ειδική σφαιροειδής βαλβίδα από το εμπόριο, με σκοπό την προσθαφαίρεση αέρα. Το δοχείο τοποθετείται στο ίδιο ύψος με την στάθμη νερού στο δοχείο τροφοδοσίας ούτως ώστε η ρύθμιση της στάθμης νερού στο δοχείο ενδοτικότητας να δίνει ακόμη και την δυνατότητα της πλήρωσης του δοχείου ενδοτικότητας με νερό, κατάσταση που αντιστοιχεί σε ενδεχόμενο μηδενικής ενδοτικότητας.

Ο κύλινδρος δοχείου κατασκευάζεται από διαφανές Plexiglas ώστε να επιτρέπει την εύκολη και άμεση μέτρηση στάθμης του νερού. Αυτή επιτυγχάνεται με κόλληση μετρητικής ταινίας επάνω στον κύλινδρο.

Αντίστοιχα η βάση του δοχείου ενδοτικότητας δε διαφέρει σε αρχιτεκτονική από το τραπέζι στήριξης του δοχείου εμβόλου. Το μέγεθος του είναι υπολογισμένο ώστε να φέρνει στο ίδιο ύψος το δοχείο ενδοτικότητας με την μέγιστη δυνατή στάθμη νερού του δοχείου τροφοδοσίας, για τους λόγους που αναφέρθηκαν παραπάνω. Οι τιμές της ενδοτικότητας που μπορούν να αναπαρασταθούν υπολογίζονται μαθηματικά από τον ορισμό της ενδοτικότητας.

$$C = - \frac{dV_A}{dP_A} \quad (4.1 - 1)$$

όπου dV_A η μεταβολή όγκου και dP_A η μεταβολή πίεσης, καθώς επίσης τη σχέση πίεσης και όγκου για πολυτροπικές μεταβολές εντός του δοχείου :

$$P_A \cdot V_A^n = \text{const} \quad (4.1 - 2)$$

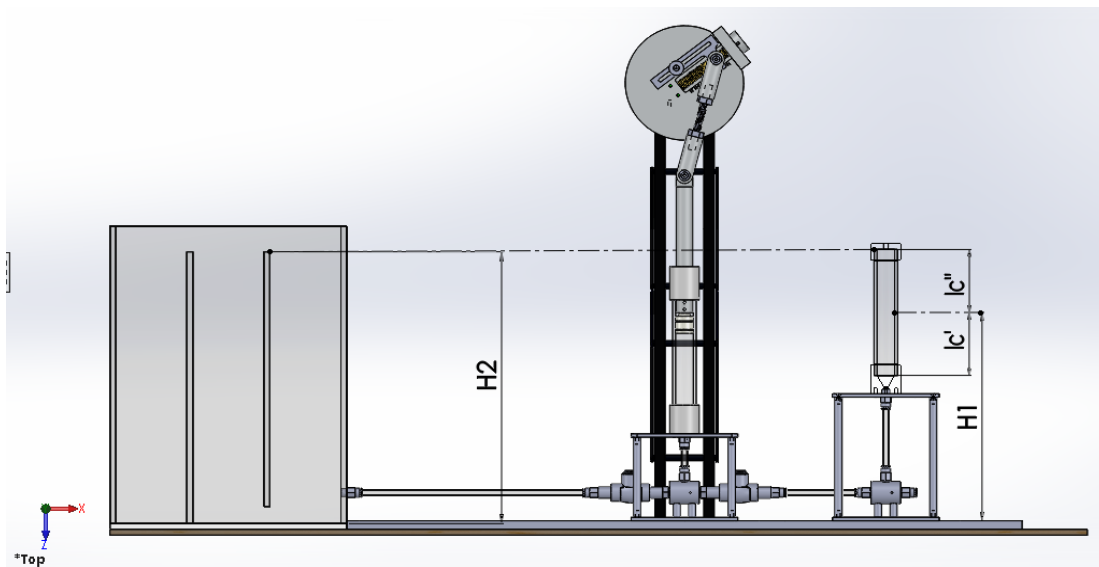
όπου n ο πολυτροπικός συντελεστής, όπου αυτή μπορεί γραφεί ως ισοθερμοκρασιακή χωρίς ιδιαίτερο σφάλμα:

$$P_A \cdot V_A = \text{const} \quad (4.1 - 3)$$

Έχουμε ως αποτέλεσμα του συνδυασμού της (1) και της (3) :

$$C = -\frac{dV_A}{dP_A} = +\frac{V_A}{P_A} \quad (4.1 - 4)$$

Το αρνητικό πρόσημο οφείλεται στο γεγονός ότι η αύξηση της πίεσης προκαλεί μείωση του όγκου αέρα και αντίστροφα.



Εικόνα 4.1-8 : Ποιοτική διαστασιολόγηση του συστήματος και του δοχείου ενδοτικότητας

Το δοχείο ενδοτικότητας στην θέση του στο σύστημα απεικονίζεται ποιοτικά στην **Εικόνα 4.1-8**.

Από την διαστασιολόγηση στην **Εικόνα 4.1-8** έχουμε τα εξής μεγέθη :

- $H1$: ύψος της στάθμης του νερού μέσα στο δοχείο ενδοτικότητας με σημείο αναφοράς τον πάτο του δοχείου τροφοδοσίας.
- $H2$: ύψος της στάθμης του νερού μέσα στο δοχείο τροφοδοσίας με σημείο αναφοράς τον πάτο του.
- lc' : μήκος της στάθμης του νερού μέσα στο δοχείο ενδοτικότητας.
- lc'' : μήκος του αέρα στο δοχείο ενδοτικότητας.

Χρησιμοποιώντας την εξίσωση Bernoulli στο δοχείο ενδοτικότητας έχουμε :

$$P_A = P_W - \rho g H1 \quad (4.1 - 5)$$

Όπου P_A η πίεση αέρα μέσα στο δοχείο, P_W η πίεση νερού στο σημείο αναφοράς, ρ η πυκνότητα νερού και g η επιτάχυνση της βαρύτητας.

Επειδή το δοχείο 1 είναι ανοιχτό στην ατμόσφαιρα έχουμε :

$$P_W = P_{atm} + \rho g H2 \quad (4.1 - 6)$$

Οπότε με συνδυασμό των σχέσεων (4), (5), (6) καταλήγουμε :

$$C = \frac{V_A}{P_{atm} + \rho g(H_2 - H_1)} \quad (4.1 - 7)$$

Έτσι, με χρήση του τύπου (7) δημιουργείται ο παρακάτω **Πίνακας 4.1-9**, που παρουσιάζει τιμές ενδοτικότητας σε προσαρμοσμένες μονάδες μέτρησης, ευρέως χρησιμοποιούμενες στην βιβλιογραφία, που προσομοιώνονται για διάφορους όγκους αέρα εντός του δοχείου ανά διαφορά ενός χιλιοστού, υπολογίζοντας ότι το ορατό μήκος του δοχείου κυμαίνεται στα 175 mm.

Μήκος Αέρα lc''(mm)	Μήκος Νερού lc' (mm)	Όγκος Αέρα Va (cm ³) ή (ml)	Ενδοτικότητα C (ml/mmHg)	Ενδοτικότητα C (m ⁴ s ² /kg)*10 ⁻¹¹
0	175	0	0	0
1	174	0,706858	0,000931	0,698087
2	173	1,413717	0,001861	1,396039
3	172	2,120575	0,002792	2,093856
4	171	2,827433	0,003722	2,791539
5	170	3,534292	0,004652	3,489086
6	169	4,24115	0,005582	4,186499
7	168	4,948008	0,006511	4,883776
8	167	5,654867	0,007441	5,58092
9	166	6,361725	0,00837	6,277928
10	165	7,068583	0,009299	6,974802
11	164	7,775442	0,010228	7,671541
12	163	8,4823	0,011157	8,368146
13	162	9,189159	0,012085	9,064616
14	161	9,896017	0,013013	9,760951
15	160	10,60288	0,013942	10,45715
16	159	11,30973	0,01487	11,15322
17	158	12,01659	0,015798	11,84915
18	157	12,72345	0,016725	12,54495
19	156	13,43031	0,017653	13,24061
20	155	14,13717	0,01858	13,93614
21	154	14,84403	0,019507	14,63154
22	153	15,55088	0,020434	15,3268
23	152	16,25774	0,021361	16,02193
24	151	16,9646	0,022287	16,71692
25	150	17,67146	0,023214	17,41178
26	149	18,37832	0,02414	18,1065
27	148	19,08518	0,025066	18,80109
28	147	19,79203	0,025992	19,49555
29	146	20,49889	0,026918	20,18987
30	145	21,20575	0,027843	20,88406
31	144	21,91261	0,028768	21,57812
32	143	22,61947	0,029694	22,27204

33	142	23,32633	0,030618	22,96583
34	141	24,03318	0,031543	23,65948
35	140	24,74004	0,032468	24,353
36	139	25,4469	0,033392	25,04639
37	138	26,15376	0,034317	25,73964
38	137	26,86062	0,035241	26,43276
39	136	27,56748	0,036165	27,12574
40	135	28,27433	0,037088	27,8186
41	134	28,98119	0,038012	28,51132
42	133	29,68805	0,038935	29,2039
43	132	30,39491	0,039858	29,89635
44	131	31,10177	0,040781	30,58867
45	130	31,80863	0,041704	31,28086
46	129	32,51548	0,042627	31,97291
47	128	33,22234	0,043549	32,66483
48	127	33,9292	0,044472	33,35661
49	126	34,63606	0,045394	34,04827
50	125	35,34292	0,046316	34,73979
51	124	36,04978	0,047238	35,43117
52	123	36,75663	0,048159	36,12243
53	122	37,46349	0,049081	36,81355
54	121	38,17035	0,050002	37,50453
55	120	38,87721	0,050923	38,19539
56	119	39,58407	0,051844	38,88611
57	118	40,29093	0,052764	39,5767
58	117	40,99778	0,053685	40,26716
59	116	41,70464	0,054605	40,95748
60	115	42,4115	0,055526	41,64767
61	114	43,11836	0,056446	42,33773
62	113	43,82522	0,057365	43,02765
63	112	44,53208	0,058285	43,71745
64	111	45,23893	0,059204	44,40711
65	110	45,94579	0,060124	45,09664
66	109	46,65265	0,061043	45,78603
67	108	47,35951	0,061962	46,47529
68	107	48,06637	0,062881	47,16442
69	106	48,77323	0,063799	47,85342
70	105	49,48008	0,064718	48,54229
71	104	50,18694	0,065636	49,23102
72	103	50,8938	0,066554	49,91962
73	102	51,60066	0,067472	50,60809
74	101	52,30752	0,068389	51,29643

75	100	53,01438	0,069307	51,98463
76	99	53,72123	0,070224	52,6727
77	98	54,42809	0,071141	53,36064
78	97	55,13495	0,072058	54,04845
79	96	55,84181	0,072975	54,73613
80	95	56,54867	0,073892	55,42367
81	94	57,25553	0,074808	56,11109
82	93	57,96238	0,075725	56,79837
83	92	58,66924	0,076641	57,48552
84	91	59,3761	0,077557	58,17253
85	90	60,08296	0,078473	58,85942
86	89	60,78982	0,079388	59,54617
87	88	61,49668	0,080304	60,23279
88	87	62,20353	0,081219	60,91928
89	86	62,91039	0,082134	61,60564
90	85	63,61725	0,083049	62,29187
91	84	64,32411	0,083963	62,97796
92	83	65,03097	0,084878	63,66393
93	82	65,73783	0,085792	64,34976
94	81	66,44468	0,086707	65,03546
95	80	67,15154	0,087621	65,72103
96	79	67,8584	0,088534	66,40647
97	78	68,56526	0,089448	67,09178
98	77	69,27212	0,090362	67,77695
99	76	69,97898	0,091275	68,462
100	75	70,68583	0,092188	69,14691
101	74	71,39269	0,093101	69,83169
102	73	72,09955	0,094014	70,51634
103	72	72,80641	0,094926	71,20086
104	71	73,51327	0,095839	71,88525
105	70	74,22013	0,096751	72,56951
106	69	74,92698	0,097663	73,25364
107	68	75,63384	0,098575	73,93763
108	67	76,3407	0,099487	74,6215
109	66	77,04756	0,100398	75,30523
110	65	77,75442	0,10131	75,98883
111	64	78,46128	0,102221	76,67231
112	63	79,16813	0,103132	77,35565
113	62	79,87499	0,104043	78,03886
114	61	80,58185	0,104954	78,72194
115	60	81,28871	0,105864	79,40489
116	59	81,99557	0,106775	80,08771
117	58	82,70243	0,107685	80,7704

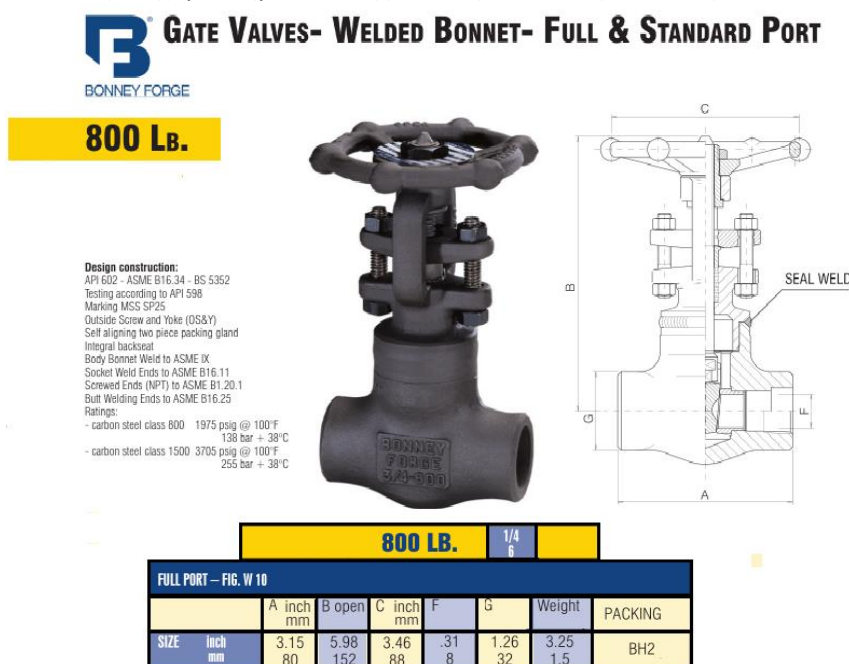
118	57	83,40928	0,108595	81,45296
119	56	84,11614	0,109505	82,13538
120	55	84,823	0,110414	82,81768
121	54	85,52986	0,111324	83,49985
122	53	86,23672	0,112233	84,18188
123	52	86,94358	0,113142	84,86379
124	51	87,65044	0,114051	85,54557
125	50	88,35729	0,11496	86,22721
126	49	89,06415	0,115868	86,90873
127	48	89,77101	0,116777	87,59011
128	47	90,47787	0,117685	88,27137
129	46	91,18473	0,118593	88,95249
130	45	91,89159	0,119501	89,63349
131	44	92,59844	0,120409	90,31435
132	43	93,3053	0,121316	90,99509
133	42	94,01216	0,122224	91,67569
134	41	94,71902	0,123131	92,35617
135	40	95,42588	0,124038	93,03651
136	39	96,13274	0,124945	93,71673
137	38	96,83959	0,125852	94,39681
138	37	97,54645	0,126758	95,07677
139	36	98,25331	0,127665	95,75659
140	35	98,96017	0,128571	96,43629
141	34	99,66703	0,129477	97,11585
142	33	100,3739	0,130383	97,79529
143	32	101,0807	0,131288	98,4746
144	31	101,7876	0,132194	99,15378
145	30	102,4945	0,133099	99,83282
146	29	103,2013	0,134004	100,5117
147	28	103,9082	0,134909	101,1905
148	27	104,615	0,135814	101,8692
149	26	105,3219	0,136719	102,5477
150	25	106,0288	0,137623	103,2261
151	24	106,7356	0,138527	103,9044
152	23	107,4425	0,139432	104,5825
153	22	108,1493	0,140335	105,2606
154	21	108,8562	0,141239	105,9384
155	20	109,563	0,142143	106,6162
156	19	110,2699	0,143046	107,2938
157	18	110,9768	0,14395	107,9713
158	17	111,6836	0,144853	108,6487
159	16	112,3905	0,145756	109,3259

160	15	113,0973	0,146658	110,003
161	14	113,8042	0,147561	110,68
162	13	114,5111	0,148463	111,3569
163	12	115,2179	0,149365	112,0336
164	11	115,9248	0,150267	112,7102
165	10	116,6316	0,151169	113,3866
166	9	117,3385	0,152071	114,063
167	8	118,0453	0,152973	114,7392
168	7	118,7522	0,153874	115,4153
169	6	119,4591	0,154775	116,0912
170	5	120,1659	0,155676	116,767
171	4	120,8728	0,156577	117,4427
172	3	121,5796	0,157478	118,1183
173	2	122,2865	0,158378	118,7937
174	1	122,9934	0,159279	119,469
175	0	123,7002	0,160179	120,1442

Πίνακας 4.1-9: Συσχέτιση όγκου αέρα στο δοχείο Windkessel με την ενδοτικότητα **C**

4.1-5: Βάνα πύλης

Για την προσομοίωση των αντιστάσεων των περιφερειακών αγγείων του αρτηριακού συστήματος, έχει επιλεγεί μια βάνα πύλης (gate valve) τα χαρακτηριστικά της οποίας απεικονίζονται στην **Εικόνα 4.1-10**.



Εικόνα 4.1-10: Βάνα πύλης (gate valve)

Ο λόγος αυτής της επιλογής είναι η όσο γίνεται μεγαλύτερη αποφυγή των αναταράξεων που μπορεί να προκαλέσει η γεωμετρία της βάνας κατά την λειτουργία τους στη ροή του ρευστού, δεδομένου του ότι η ροή

είναι μη μόνιμη και παλινδρομική. Έτσι, μεταβάλλοντας τη διατομή της σωλήνωσης πετυχαίνουμε κατά βούληση διαφορετικές τιμές αντίστασης στο σύστημα.

Τέλος για την ακριβή μετατόπιση της εσωτερικής πύλης, της μεταβολής της διατομής και κατά συνέπεια της μεταβολής των τιμών αντίστασης της βάνας σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε μετρητής ο οποίος τοποθετήθηκε στο επάνω μέρος της βάνας. Αυτός σχεδιάστηκε έτσι ώστε να χωρίζει μια πλήρη περιστροφή του πάνω μέρους της βάνας σε 10 κλάσματα-τόξα των 36° δεδομένου ότι ο Ατέρμων κοχλίας της βάνας έχει βήμα 2mm.

4.1-6: Δεύτερο δοχείο συγκέντρωσης νερού (Δοχείο κατάθλιψης).

Το δεύτερο δοχείο συγκέντρωσης νερού αποτελεί την δεξαμενή εκείνη όπου το νερό καταθλίβεται, δηλαδή, καταλήγει κατά την λειτουργία του συστήματος. Το δοχείο είναι συναρμολόγημα επτά μερών κατάλληλης διάταξης και διαστάσεων.

Από τα μέρη του το δοχείο χωρίζεται σε δύο χώρους **A**, **B** διαφορετικής ενδοτικότητας. Οι διαστάσεις του καθορίζονται ως εξής :

- Ολικό δοχείο εξωτερικές διαστάσεις : $200 \times 150 \times 235 \text{ mm}^3$
- Ολικό δοχείο εσωτερικές διαστάσεις : $190 \times 140 \times 230 \text{ mm}^3$
- **A** χώρος εσωτερικές διαστάσεις : $60 \times 140 \times 200 \text{ mm}^3$
- **B** χώρος εσωτερικές διαστάσεις : $125 \times 140 \times 200 \text{ mm}^3$

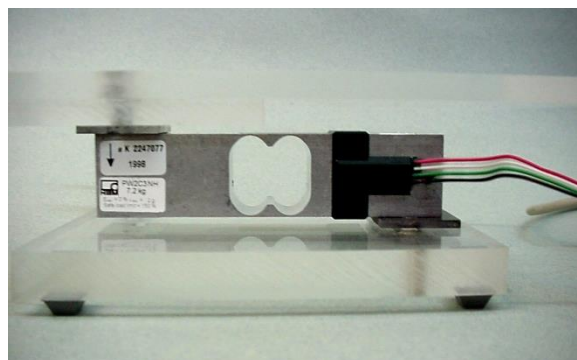
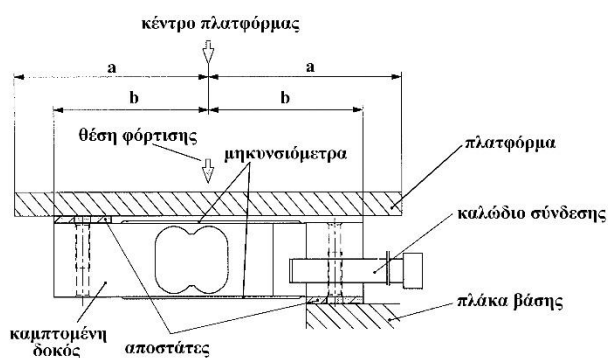
Το δοχείο κατάθλιψης είναι τοποθετημένο σε μια ζυγαριά ακριβείας. Ρόλος αυτής είναι να μετράει την ποσότητα του νερού και τον χρόνο και ρυθμό με τον οποίο το νερό εξέρχεται από το σύστημα.

Ο σωλήνας απόληξης του συστήματος αποβάλει το νερό στο χώρο **A**, χωρίς να εφάπτεται, με σκοπό να ελαχιστοποιηθούν οι πιθανές αναταράξεις που μπορεί το αποβαλλόμενο νερό να δημιουργήσει στον αισθητήρα της ζυγαριάς.

4.2 : Μετρητικά όργανα

4.2-1: Ζυγαριά ακριβείας (Δυναμοκυψέλη)

Η μέτρηση του εγχυόμενου βάρους ρευστού γίνεται με δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης (Εικόνα 4.2-1).



Σχήμα 4.2-1. Δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης (μήκος πλατφόρμας: $2a = 200 \text{ mm}$, μήκος καμπτομένης δοκού: $2b = 130 \text{ mm}$).

Είναι της εταιρίας HBM (μοντέλο PW2C3 NH-1998). Έχει ανώτατο όριο φορτίου 7.2 Kg, με όριο ασφαλούς φορτίου 150 % και διαστάσεις πλατφόρμας $200 \times 150 \text{ mm}$. Η καμπτομένη δοκός είναι κατασκευασμένη από

αλουμίνιο και η πλατφόρμα από plexiglas. Τα τεχνικά χαρακτηριστικά της δυναμοκυψέλης παρουσιάζονται στον **Πίνακα 4.2-2**.

Η δυναμοκυψέλη καμπτομένης δοκού ενός σημείου φόρτισης συνδέεται με αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα, ο οποίος μετατρέπει το αναλογικό σήμα της δυναμοκυψέλης σε ψηφιακό και το οδηγεί στον ηλεκτρονικό υπολογιστή για περαιτέρω επεξεργασία.

Μεγέθη		Μονάδες μέτρησης	Τιμές
Δυναμικότητα (φορτίο λειτουργίας)		kg	6
Μέγιστο ονομαστικό φορτίο		kg	7.2
Μέγιστο μέγεθος πλατφόρμας		mm	380 x 380
Επίδραση θερμοκρασίας στην έξοδο ^{(1), (2)}	για εύρος +20 °C ÷ +40 °C	%/10K	±0.0146
	για εύρος -10 °C ÷ +20 °C	%/10K	±0.0098
Επίδραση θερμοκρασίας σε ισορροπία μηδενισμού ⁽²⁾		%/10K	±0.0389
Σφάλμα υστέρησης ^{(1), (2)}		%	±0.0097
Σφάλμα μη γραμμικότητας ^{(1), (2)}		%	±0.0097
Σφάλμα εκκεντρότητας φορτίου κατά OIML R76 ^{(2), (3)}		%	±0.0194
Παραμένον σφάλμα εξόδου αποφόρτισης DR (30min) κατά OIML R60 ⁽²⁾		%	±0.0167
Αντίσταση εισόδου		Ω	350 ÷ 500
Αντίσταση εξόδου		Ω	350 ÷ 500
Τάση αναφοράς διέγερσης		V	5
Προτεινόμενο εύρος τάσης διέγερσης		V	1 ÷ 15
Αντίσταση μόνωσης		GΩ	>1
Ονομαστικό εύρος θερμοκρασιών		°C	-10 ÷ +40
Εύρος θερμοκρασιών λειτουργίας		°C	-10 ÷ +50
Εύρος θερμοκρασιών αποθήκευσης		°C	-25 ÷ +70
Μέγιστο μικτό φορτίο		% του ονομ. φορτίου	17
Όριο ασφαλείας (για μέγιστη εκκεντρότητα 100 mm)		% του ονομ. φορτίου	150
Όριο πλευρικής φόρτισης		% του ονομ. φορτίου	300
Απόκλιση στο ονομαστικό φορτίο (±15%)		mm	0.20
Ιδιοσυχνότητα στο ονομαστικό φορτίο, κατά προσέγγιση		Hz	35
Ιδιοσυχνότητα για 0.5 kg μικτό φορτίο, κατά προσέγγιση		Hz	100
Βάρος, κατά προσέγγιση		kg	0.25

⁽¹⁾ Το μέγιστο σύνθετο σφάλμα λόγω της μη-γραμμικότητας, υστέρησης και θερμοκρασιακής επίδρασης στην έξοδο, ωστόσο δεν υπερβαίνει τα όρια σφάλματος κατά OIML-R60 (Organisation Internationale de Métrologie Légale-Réglémentation 60).

⁽²⁾ Όλα τα σχετικά σφάλματα προσδιορίζονται αναφορικά με το ονομαστικό φορτίο εξόδου.

⁽³⁾ Φορτιζόμενη με το 30% της δυναμικότητας (φορτίο λειτουργίας) για εκκεντρότητα 142 mm.

Πίνακας 4.2-2: Τεχνικά χαρακτηριστικά δυναμοκυψέλης PW2C3 NH-HBM.

4.2-2: Αισθητήρες πίεσης.

Για τη μέτρηση των πιέσεων χρησιμοποιούνται 3 αισθητήρες πίεσης όπως φαίνονται στην **Εικόνα 4.2-3**. Το εύρος λειτουργίας των αισθητήρων είναι -50 έως +300mmHg, ενώ η ιδιοσυχνότητα λειτουργίας τους είναι 22.0

Hz. Δηλαδή, η συχνότητα δειγματοληψίας πρέπει να είναι ορισμένη πάνω από αυτήν την τιμή, ώστε να αξιοποιείται στο μέγιστο η ικανότητα του αισθητήρα να λαμβάνει μετρήσεις.

Ο κάθε αισθητήρας είναι ενσωματωμένος σε ένα αποστειρωμένο σετ παρακολούθησης πίεσης (pressure monitoring set), όπως φαίνεται για έναν στην **Εικόνα 4.2-4**.



Εικόνα 4.2-3: Αναλώσιμοι μορφοτροπείς πίεσης TruWave της Edwards (Disposable Pressure Transducers)



Εικόνα 4.2-4: Αποστειρωμένο σετ παρακολούθησης πίεσης της Edwards (pressure monitoring set).

4.2-3: Αναλογικός-Ψηφιακός Μετατροπέας (ADC) και Η/Υ

Το καλώδιο του κάθε αισθητήρα συνδέεται με τον αναλογικό-ψηφιακό μετατροπέα (Analog to Digital Converter, ADC, **Εικόνα 4.2-5α**), όπου γίνεται η μετατροπή του σήματος από αναλογικό σε ψηφιακό και στη συνέχεια το σήμα οδηγείται σε έναν φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή (**Εικόνα 4.2-5β**) για την καταγραφή των χρονοσειρών της πίεσης.

Ο αναλογικός-ψηφιακός μετατροπέας (Analog to Digital Converter, ADC) είναι ο QuantumX MX440A της HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH) τεσσάρων καναλιών για τη λήψη δεδομένων. Το λογισμικό οδήγησης του ADC είναι το catmanEasy ver.:3.4.2.52 της ίδιας εταιρείας HBM και είναι εγκατεστημένο στον φορητό ηλεκτρονικό υπολογιστή.

Ο φορητός ηλεκτρονικός υπολογιστής (laptop PC) είναι ο satellite c855-2ck της εταιρείας Toshiba (εικόνα 2.1-5α) με οθόνη 15.6'', επεξεργαστή core i3-2348M CPU@2.3GHz, μνήμη 4096MB RAM (1333MHz/1GB VRAM) και

το λογισμικό του είναι MS Windows 8 (64-bit). Η επικοινωνία μεταξύ του PC και του ADC γίνεται μέσω θυρών ETHERNET.



(α)



(β)

Εικόνα 4.2-5: (α) Αναλογικός-Ψηφιακός μετατροπέας (β) Ηλεκτρονικός Υπολογιστής

4.2-4: Θερμόμετρο

Θερμόμετρο με δύο αισθητήρες (κατασκευής OWIM GmbH & Co. KG, **Εικόνα 4.2-5**) χρησιμοποιείται για την μέτρηση της θερμοκρασίας του νερού για εύρεση της πυκνότητάς του, καθώς και της θερμοκρασίας του χώρου του εργαστηρίου. Ο συνδεδεμένος με καλώδιο αισθητήρας βυθίζεται στο δοχείο τροφοδοσίας και καταγράφει την θερμοκρασία του νερού, ενώ ο αισθητήρας στο σώμα του θερμομέτρου την θερμοκρασία του χώρου. Οι δύο θερμοκρασίες καταγράφονται σε κάθε μέτρηση.



Εικόνα 4.2-6 Θερμόμετρο με δύο αισθητήρες.

Στοιχεία θερμομέτρου:

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας εσωτερικά: -10°C έως $+50^{\circ}\text{C}$

Εύρος μέτρησης θερμοκρασίας εξωτερικά: -50°C έως $+70^{\circ}\text{C}$

Ανοχή:
 $(-50^{\circ}\text{C} \text{ έως } 0^{\circ}\text{C}) \pm 2^{\circ}\text{C}$
 $(0^{\circ}\text{C} \text{ έως } +30^{\circ}\text{C}) \pm 1^{\circ}\text{C}$
 $(+30^{\circ}\text{C} \text{ έως } +70^{\circ}\text{C}) \pm 2^{\circ}\text{C}$

4.2-5: Ταχύμετρο

Για την εύρεση της συχνότητας περιστροφής της αντλίας χρησιμοποιείται ταχύμετρο οπτικού τύπου χειρός, με φωτοεκπομπό δίοδο (LED) κόκκινου χρώματος (**Εικόνα 4.2-7**). Είναι της εταιρίας ITECO trading (τύπου 8801.001). Το συστηματικό σφάλμα του ταχύμετρου είναι 0.1 rpm για το διάστημα από 12 έως 999.9 rpm και 1 rpm για στροφές μεγαλύτερες από 1000 rpm σύμφωνα με τον **Πίνακα 4.2-8** που δίνεται από τον κατασκευαστή.



Εικόνα 4.2-7: Οπτικό ταχύμετρο χειρός.

Οθόνη ένδειξης	5 ψηφίων (ultrabright LED)
Εύρος μέτρησης	$12.0 \div 100000 \text{ rpm}$
Ακρίβεια έως 999.9 rpm	$\pm 0.1 \text{ rpm}$
Ακρίβεια από $1000 \div 20000 \text{ rpm}$	$\pm 1 \text{ rpm}$
Ακρίβεια από $20000 \div 100000 \text{ rpm}$	$\pm 0.005 \%$
Πεδίο αποστάσεων ανάκλασης	$10 \div 300 \text{ mm}$
Χρόνος μετρούμενης περιόδου από $12.0 \div 60.0 \text{ rpm}$	χρόνος μίας πλήρους περιστροφής
Χρόνος μετρούμενης περιόδου από $60.0 \div 100000 \text{ rpm}$	1 s
Θερμοκρασία λειτουργίας	$0 \div 45^{\circ}\text{C}$
Τάση τροφοδοσίας	6 Volts
Διαστάσεις	$180 \times 60 \text{ mm}$
Βάρος	0.4 kg

Πίνακας 4.2-8 : Τεχνικά χαρακτηριστικά ταχυμέτρου.

Κεφάλαιο 5: Πειραματική διαδικασία και ανάλυση των μετρήσεων

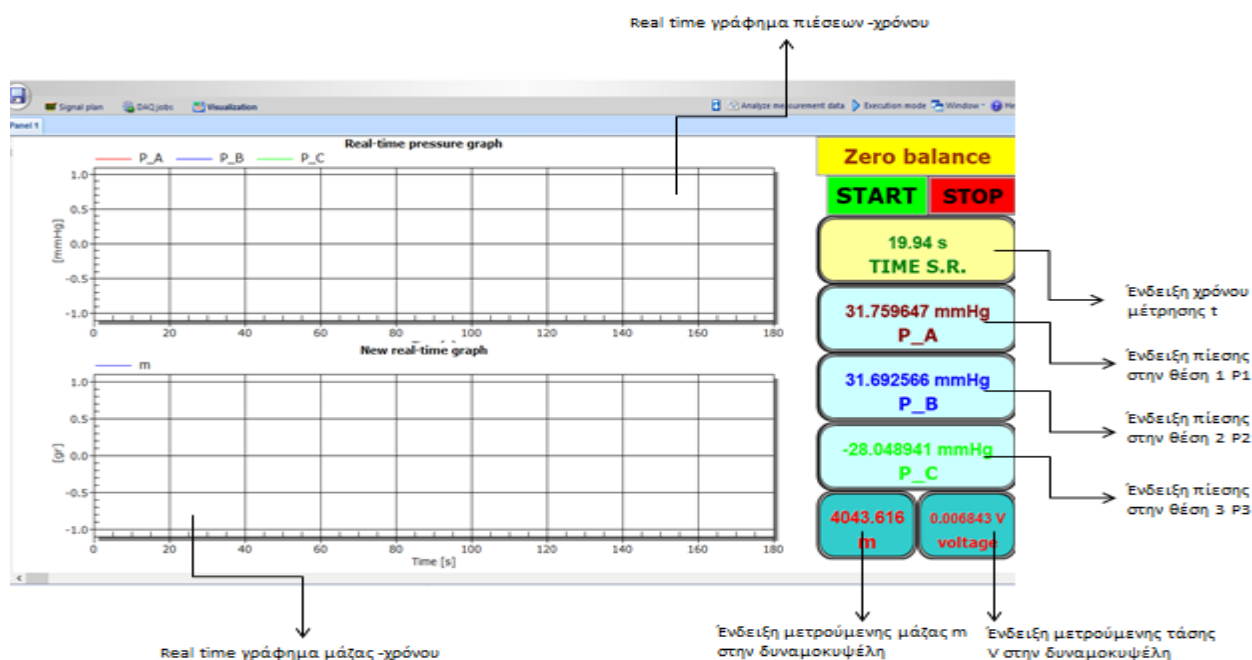
Σε αυτό το κεφάλαιο παρουσιάζεται αναλυτικά η πειραματική διαδικασία στον χώρο του εργαστηρίου, και στην συνέχεια η ανάλυση και η επεξεργασία των πειραματικών μετρήσεων για να ληφθούν τα επιθυμητά αποτελέσματα.

5.1: Πειραματική διαδικασία

Αρχικά τίθεται σε λειτουργία το κλιματιστικό, ώστε η θερμοκρασία στον χώρο να διατηρείται σταθερή. Ελέγχεται η σωστή σύνδεση όλων των συσκευών της διάταξης όπως περιγράφονται στο κεφάλαιο 4 και έπειτα συνδέεται ο ADC στην τροφοδοτική ισχύ. Έπειτα από χρονικό διάστημα είκοσι λεπτών έχει επιτευχθεί θερμική ισορροπία στον ADC και στο μηχανισμό της δυναμοκυψέλης.

Πριν ξεκινήσει οποιαδήποτε μέτρηση, καταγράφεται η θερμοκρασία του χώρου. Στον υπολογιστή που είναι συνδεδεμένος με τον ADC γίνεται εκκίνηση του προγράμματος CatmanEasy V3.42 στο οποίο απεικονίζονται και καταγράφονται τα μετρούμενα μεγέθη (Σχ. 5.1-1). Έπειτα γίνεται ρύθμιση των μετρητικών οργάνων.

Οι αισθητήρες πίεσης ελέγχονται για ύπαρξη φυσαλίδων αέρα, εξαερώνονται και τρέφονται με την ένδειξη OFF προς την διάταξη, ώστε να μετρούν την ατμοσφαιρική πίεση. Αυτή η μέτρηση θεωρείται ως μηδενική και αποθηκεύεται. Στην συνέχεια πρότυπα βάρη μάζας 0,1-2kg τοποθετούνται πάνω στην δυναμοκυψέλη για να διαπιστωθεί η σωστή μετρητική ικανότητά της. Σε περίπτωση σφάλματος σε αυτή την μέτρηση, αλλάζονται οι σταθερές α, c της γραμμικής συνάρτησης μετάδοσης της δυναμοκυψέλης $m = \alpha V + c$, μέχρι η ένδειξη να ανταποκρίνεται στις τιμές των μετρούμενων βαριδιών. Αφού το δοχείο κατάθλιψης τοποθετηθεί άδειο επάνω στην δυναμοκυψέλη μηδενίζεται η ένδειξη.

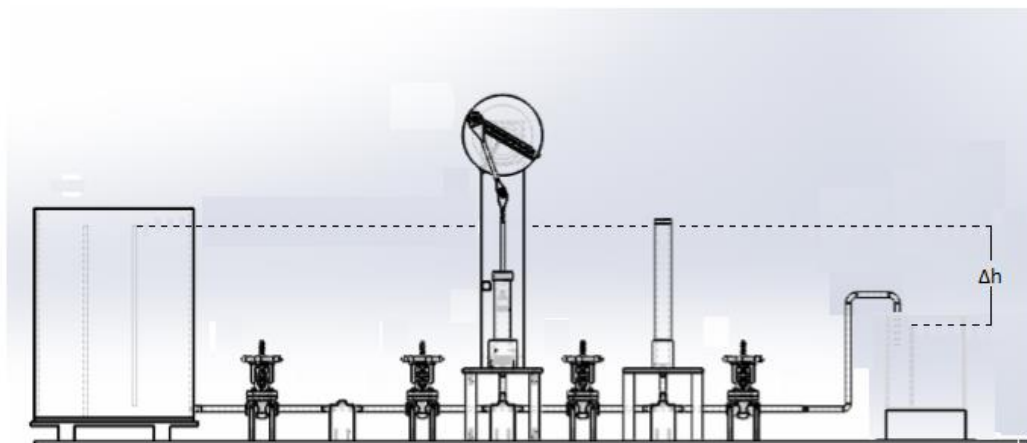


Σχήμα 5.1-1: Γραφικό περιβάλλον CatmanEasy V3.42 για την καταγραφή των μετρούμενων μεγεθών.

Μετά την ρύθμιση των μετρητικών οργάνων ο χώρος Α του δοχείου κατάθλιψης γεμίζεται μέχρι την υπερχειλίση και στο δοχείο παροχής γίνεται εκκίνηση της φυγοκεντρικής αντλίας, ώστε η στάθμη του νερού στους χώρους Β, C του δοχείου να παραμένει σταθερή στο ύψος της υπερχειλίσης. Ελέγχεται το ύψος της υπερχειλίσης και στα δύο δοχεία να είναι ίσο με 475mm από τη βάση της διάταξης και ο σωλήνας κατάθλιψης να έχει βυθιστεί περίπου 2cm και να μην προσάπτει στα τοιχώματα του δοχείου. Η ένδειξη OFF των αισθητήρων πίεσης στρέφεται προς την ατμόσφαιρα, ώστε να μετράται η πίεση εντός της διάταξης, ο στρόφαλος του εμβόλου τοποθετείται σε μεσαία θέση και λαμβάνεται μέτρηση χωρίς να γίνει εκκίνηση του κινητήρα, ώστε να ανιχνευθούν τυχόν λάθη στη ρύθμιση της διάταξης.

5.1-1: Μετρήσεις μόνιμης ροής (Steady Flow)

Για τις μετρήσεις μόνιμης ροής η δυναμοκυψέλη και το δοχείο κατάθλιψης νερού τοποθετούνται χαμηλότερα της αρχικής τους θέσης με διαφορά ύψους Δh , ώστε να δημιουργηθεί ροή μεταξύ των δύο δοχείων (Σχ.5.1-2). Ο στρόφαλος τοποθετείται σε μεσαία θέση, ώστε και οι δύο βάνες αντεπιστροφής να είναι ανοικτές. Γίνεται μέτρηση της μάζας m και των πιέσεων P_1, P_2, P_3 μέχρι πλήρωσης του δοχείου κατάθλιψης. Η κάθε μέτρηση γίνεται με σταδιακή περιστροφή (άνοιγμα) του επάνω μέρους της βάνας πύλης αρχικά με άνοιγμα του διακένου y_R κατά 0,1 mm ($0,3\text{mm} \leq y_R \leq 0,8\text{mm}$) και έπειτα κατά 0,5 mm ($0,8\text{mm} \leq y_R \leq 5,3\text{mm}$). Η παραπάνω διαδικασία επαναλαμβάνεται για τις τρεις διαφορές ύψους Δh (996mm, 907mm, 828 mm). Σε κάθε μέτρηση καταγράφεται η θερμοκρασία του αέρα και του νερού.



Σχήμα 5.1-2: Πειραματική διάταξη για μετρήσεις μόνιμης ροής

5.1-2: Μετρήσεις μη μόνιμης ροής (Unsteady Flow)

Για αυτές τις μετρήσεις τα δοχεία παροχής και κατάθλιψης τοποθετούνται ώστε οι υπερχειλίσεις τους να βρίσκονται σε ίσο ύψος 475mm από την βάση της διάταξης και ο κινητήρας τίθεται σε λειτουργία προκαλώντας περιστροφή του στρόφαλου και κίνηση του εμβόλου.

Όπως αναφέρθηκε στο κεφάλαιο 4, η συχνότητα περιστροφής του κινητήρα προσομοιώνει την συχνότητα του καρδιακού παλμού. Για τις ακόλουθες μετρήσεις επιλέχθηκαν τρεις διαφορετικές ταχύτητες περιστροφής n , οι οποίες είναι εντός των πλαισίων της ανθρώπινης καρδιακής λειτουργίας και επιτρεπτές από την ισχύ του κινητήρα και το εύρος των αισθητήρων. Επιλέχθηκαν οι ταχύτητες περιστροφής n 40,65 και 90 RPM που αντιστοιχούν σε ρυθμό καρδιάς σε κατάσταση ύπνου, φυσιολογική λειτουργία και άσκηση. Η λειτουργία του κινητήρα στη σωστή ταχύτητα ελέγχεται με ταχύμετρο.

Για κάθε ταχύτητα γίνονται μετρήσεις με διαφορετική ενδοτικότητα C που αντιστοιχεί στην ενδοτικότητα ενός αγγείου και η μεταβολή της δείχνει πόσο σκληρό ή ελαστικό είναι ένα αγγείο λόγω γήρανσης ή σχηματισμό αθηρωματικής πλάκας. Αυτή μεταβάλλεται με σταδιακή πλήρωση του δοχείου Windkessel με νερό. Για κάθε ταχύτητα η πρώτη μέτρηση γίνεται με άδειο δοχείο και μετέπειτα μετρήσεις αυξάνουν σταδιακά την στάθμη του νερού στο δοχείο Windkessel κατά 1cm μέχρι πληρώσεως του, όπου και γίνονται μετρήσεις με μηδενική

ενδοτικότητα C .

Ο όγκος εμβολισμού V_b , που παραμετροποιεί το πλάτος παροχής αίματος ενός αγγείου είναι άλλη μεταβλητή για την οποία χρησιμοποιήθηκαν τρεις διαφορετικές τιμές οι οποίες ανήκουν στο εύρος των τιμών του όγκου παλμού της ανθρώπινης καρδιάς. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν είναι 4,241ml, 5,655 ml και 7,069 ml. Ο όγκος εμβολισμού μεταβάλλεται με αλλαγή του μήκους διαδρομής του στροφάλου του παλμικού μηχανισμού της διάταξης.

Τέλος, με περιστροφή του επάνω μέρους της βάνας πύλης μεταβάλλεται το διάκενό της y_R . Έτσι προσομοιώνεται η αντίσταση τερματικών αγγείων στο τέλος του προς μελέτη αγγείου ή παθολογία στένωσης του ίδιου του αγγείου. Ξεκινώντας με την βάνα πλήρως ανοικτή ($y_R=11,4\text{mm}$) σε κάθε ακόλουθη μέτρηση το διάκενο μικραίνει κατά 1mm μέχρι $y_R=1,4\text{mm}$ και έπειτα κατά 0,2mm μέχρι $y_R=0,4\text{mm}$, όπου το διάκενο υπερκαλύπτεται και η βάνα θεωρείται πρακτικά κλειστή. Στη στρόφιγγα της βάνας πύλης είναι εγγεγραμμένα 10 σημάδια που την χωρίζουν σε τμήματα των 36° . Γνωρίζοντας ότι η βάνα πύλης έχει βήμα $\beta=2\text{mm}$ και χρησιμοποιώντας τα σημάδια αυτά, ρυθμίζεται κάθε φορά το διάκενο y_R .

Πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις για κάθε συνδυασμό των παραπάνω παραμέτρων. Συγκεκριμένα πρώτα επιλεγόταν μία ταχύτητα περιστροφής n και το δοχείο Windkessel ήταν άδειο και η βάνα πύλης πλήρως ανοικτή. Μετά από κάθε μέτρηση γινόταν σταδιακό κλείσιμο του διακένου y_R έως ότου η ροή να είναι ελάχιστη ($y_R=0,1\text{mm}$). Έπειτα η βάνα πύλης ανοιγόταν πάλι πλήρως και απελευθερωνόταν αέρας από το δοχείο Windkessel έως να ανεβεί η στάθμη του νερού κατά 1 cm και η διαδικασία επαναλαμβανόταν μέχρι πλήρωσης του δοχείου με νερό. Όταν έχουν ληφθεί μετρήσεις για κάθε ενδοτικότητα C και διάκενο y_R , τότε αλλάζεται ο όγκος εμβολισμού V_b . Εφόσον έχουν καλυφθεί όλοι οι πιθανοί συνδυασμοί, τότε αλλάζεται η ταχύτητα περιστροφής n .

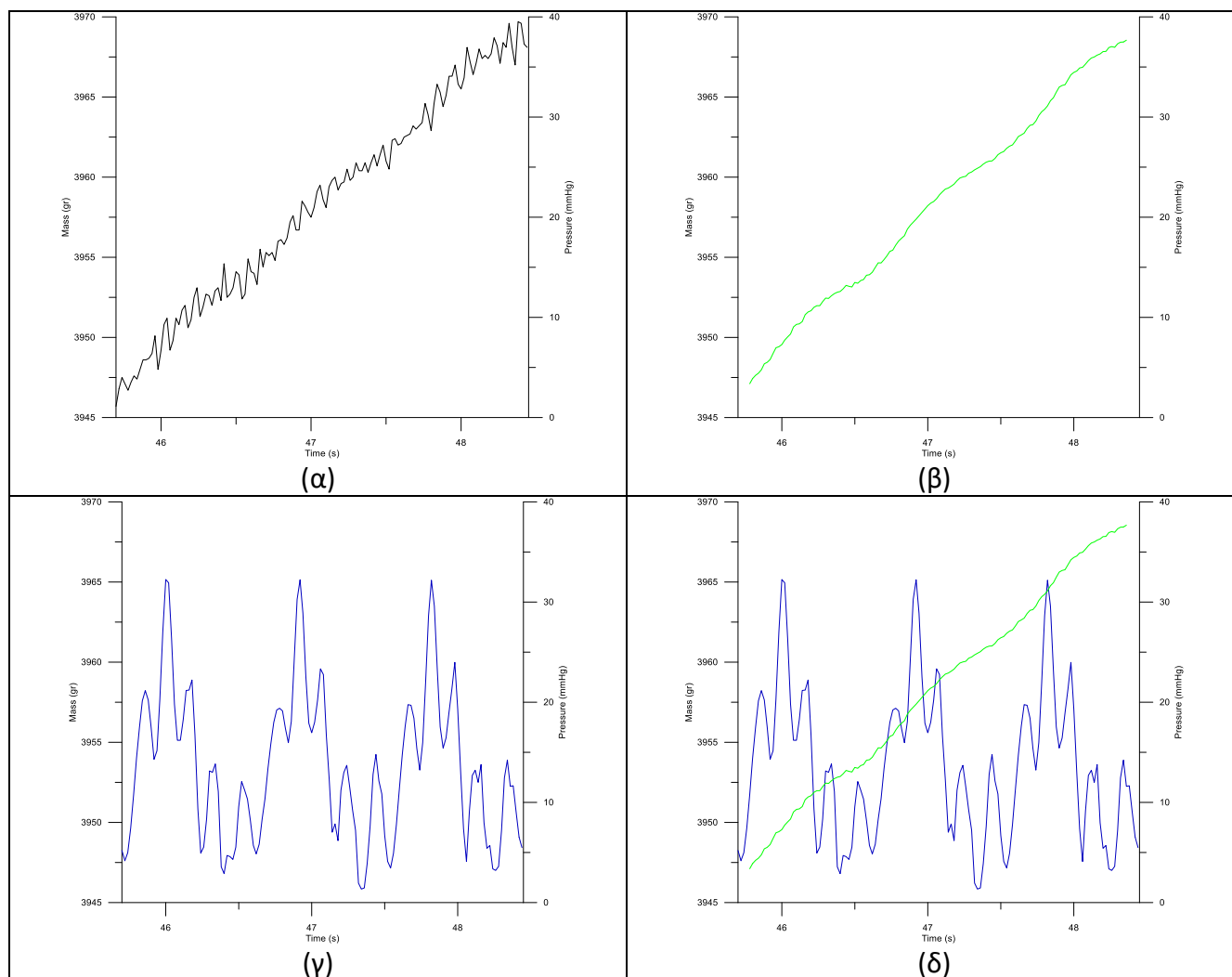
Κατά την διάρκεια κάθε μέτρησης σημειώνεται η θερμοκρασία νερού και αέρα αλλά και η διακύμανση της στάθμης του νερού στο δοχείο Windkessel σε σχέση με την αρχική της θέση. Επίσης ελέγχεται μέσω του γραφικού περιβάλλοντος το εύρος διακύμανσης των πιέσεων να είναι σταθερό, ώστε να έχουν παύσει οι μεταβολές στην ισορροπία του συστήματος από αλλαγές των παραμέτρων C , y_R . Κάθε μέτρηση έχει διάρκεια περί τα τρία λεπτά ή μέχρι να πληρωθεί το δοχείο κατάθλιψης. Μετά την πλήρωση του το νερό στον χώρο Β το δοχείου κατάθλιψης αντλείται πίσω στο δοχείο παροχής, προσέχοντας ο χώρος Α να παραμείνει πλήρης με νερό μέχρι το ύψος της υπερχειλίσης.

Παράμετροι πειράματος	Επηρεαζόμενο μέγεθος	Ελάχιστη τιμή	Μέγιστη τιμή	Βήμα αύξησης της παραμέτρου	Πλήθος Τιμών
Στροφές κινητήρα	Συχνότητα εμβολισμού	40rpm	90rpm	15rpm	3
Μήκος διαδρομής στροφάλου	Όγκος εμβολισμού	6mm	10mm	2mm	3
Άνοιγμα διάκενου βάνας πύλης	Αντίσταση στη ροή	0,4mm	11,4mm	1mm (11,4mm-1,4mm) 0,2mm (1,4mm-0.4mm)	16
Ύψος αέρα στο δοχείο Windkessel	Ενδοτικότητα	0cm	17cm	1cm	18

Πίνακας 5.1-3: Τιμές παραμέτρων του πειράματος

5.2 : Ανάλυση των μετρήσεων

Οι καταγεγραμμένες από το Catman μετρήσεις επεξεργάζονται στο πρόγραμμα Grapher (Σχ. 5.2-1). Προκύπτουν διαγράμματα των πιέσεων(mmHg) - χρόνου στις 3 θέσεις των αισθητήρων πίεσης (σχήμα 4.1), καθώς μάζας(g)-χρόνου από τον αισθητήρα της δυναμοκυψέλης. Αποκόπτεται το τελικό τμήμα κάθε μέτρησης για ευχέρεια επεξεργασίας και ακεραιότητας των δεδομένων, καθώς η συχνότητα και το εύρος της ταλάντωσης της πίεσης πρέπει να έχουν σταθεροποιηθεί. Καταγράφονται η γωνιακή ταχύτητα ω , η συχνότητα f , καθώς και οι μέγιστες, ελάχιστες και μέσες πιέσεις (P_{\max} , P_{\min} , P_m) για κάθε αισθητήρα.



Σχήμα 5.2-1 : Διαγράμματα μάζας m (g)-χρόνου t (s) πριν (α) και μετά (β) την εξομάλυνση και διαφοράς πίεσης θέσεων 2-3 [(mmHg)-χρόνου] (γ), καθώς και η σύνθεση τους (δ).

Έπειτα το διάγραμμα μάζας-χρόνου εξομαλύνεται με τη μέθοδο κινούμενου μέσου. Με την μέθοδο Peak to Peak για το διάγραμμα πίεσης στη θέση 2 αποκόπτεται τμήμα του εξομαλυμένου διαγράμματος για 3 περιόδους. Στη συνέχεια το αποτέλεσμα υφίσταται μετατροπή Fourier (Fast Fourier Transform, πλήρης κώδικας στο παράρτημα) και προκύπτει καμπύλη παροχής μάζας (gr/s)-χρόνου για κάθε μέτρηση, καθώς και μέγιστη, ελάχιστη και μέση παροχή μάζας(gr/s) (\dot{m}_{\max} , \dot{m}_{\min} , \dot{m}_m) για κάθε μέτρηση.

Από την καταγεγραμμένη θερμοκρασία υπολογίζεται η πυκνότητα του νερού από τη εμπειρική σχέση (Kell, 1975) :

$$\rho = \frac{999,83952 + 16,945176 \cdot t - 7,987401 \times 10^{-3} \cdot t^2 - 46,170461 \times 10^{-6} \cdot t^3 + 105,56302 \times 10^{-9} \cdot t^4 - 280,54253 \times 10^{-12} \cdot t^5}{1 + 16,879850 \times 10^{-3} \cdot t} [Kg/m^3] \quad (5.2-1)$$

και υπολογίζεται η μέση παροχή όγκου (ml/s) με τη σχέση :

$$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (5.2-2)$$

Έπειτα με την θερμοκρασία υπολογίζεται το ιξώδες μ από την εμπειρική σχέση (Krestin, 1978)

$$\mu = \mu(20^\circ C) \cdot 10^{\left\{ \frac{20-t}{t+96} [1,2364 - 1,37 \times 10^{-3} \cdot (20-t) + 5,7 \times 10^{-6} \cdot (20-t)^2] \right\}} \quad (5.2-3)$$

, όπου $\mu(20^\circ) = 0,0010016 Pa \cdot s = 1,0016 \cdot 10^{-3} Pa \cdot s$.

και το κινηματικό ιξώδες ν :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (5.2-4)$$

Υπολογίζονται για κάθε μέτρηση ο αριθμός Reynolds **Re** και ο αριθμός Womersley **W** από τις σχέσεις:

$$Re = u \frac{D}{\nu} \quad (5.2-5)$$

$$W = R \sqrt{\frac{\omega}{\nu}} \quad (5.2-6),$$

όπου

$$u = 4 \frac{Q}{(\pi D^2)} \quad (5.2-7)$$

και **R**, **D** η ακτίνα και η διάμετρος του σωλήνα.

Υπολογίζονται τα πλάτη παροχής και πίεσης **Q_b**, **P_b** για κάθε πίεση :

$$Q_b = Q_{max} - Q_{min} \quad (5.2-8)$$

$$P_b = P_{max} - P_{min} \quad (5.2-9)$$

Από την σχέση του Bernoulli για μη μόνιμη ροή με απώλειες στη διαδρομή του ρευστού μεταξύ 2^{ου} και 3^{ου} αισθητήρα έχουμε:

$$\frac{\rho}{2} u_2^2 + P_2 + \rho \int_2^3 \frac{\partial u}{\partial t} dx = \frac{\rho}{2} u_3^2 + P_3 + \zeta \frac{\rho}{2} u_2^2 \quad (5.2-10)$$

Ο όρος $\rho \int_2^3 \frac{\partial u}{\partial t} dx$ μπορεί να θεωρηθεί σχεδόν μηδενικός και αμελητέος.

Επίσης λόγω ότι $u_2 = u_3$ και $Q = u \pi D^2 / 4$ η (5.2-10) γίνεται:

$$P_2 = P_3 + \zeta \frac{\rho}{2} u_2^2 \Rightarrow P_2 - P_3 = \frac{8 \zeta \rho Q^2}{\pi^2 D^4} \quad (5.2-11)$$

Λύνοντας ως προς ζ και υπολογίζοντας με την μέση παροχή και πιέσεις, υπολογίζεται η εμπέδηση της διάταξης από την σχέση:

$$\zeta_m = \frac{\pi^2 D^4}{8\rho} \frac{P_{m2} - P_{m3}}{Q_m^2} \quad (5.2-12)$$

Αντίστοιχα υπολογίζοντας για τα εύρη παροχής και πιέσεων ισχύει:

$$\zeta_b = \frac{\pi^2 D^4}{8\rho} \frac{P_{b2} - P_{b3}}{Q_b^2} \quad (5.2-13),$$

όπου Q_m η μέση παροχή όγκου κάθε μέτρησης και P_{m2} , P_{m3} οι μέσες πιέσεις στις θέσεις 2,3 και P_{b2} , P_{b3} τα αντίστοιχα πλάτη πίεσης. Έπειτα από τον υπολογισμό των παραπάνω μεγεθών δημιουργούνται τα διαγράμματα μεγεθών και συμμεταβολής παραμέτρων που παρουσιάζονται στο επόμενο κεφάλαιο.

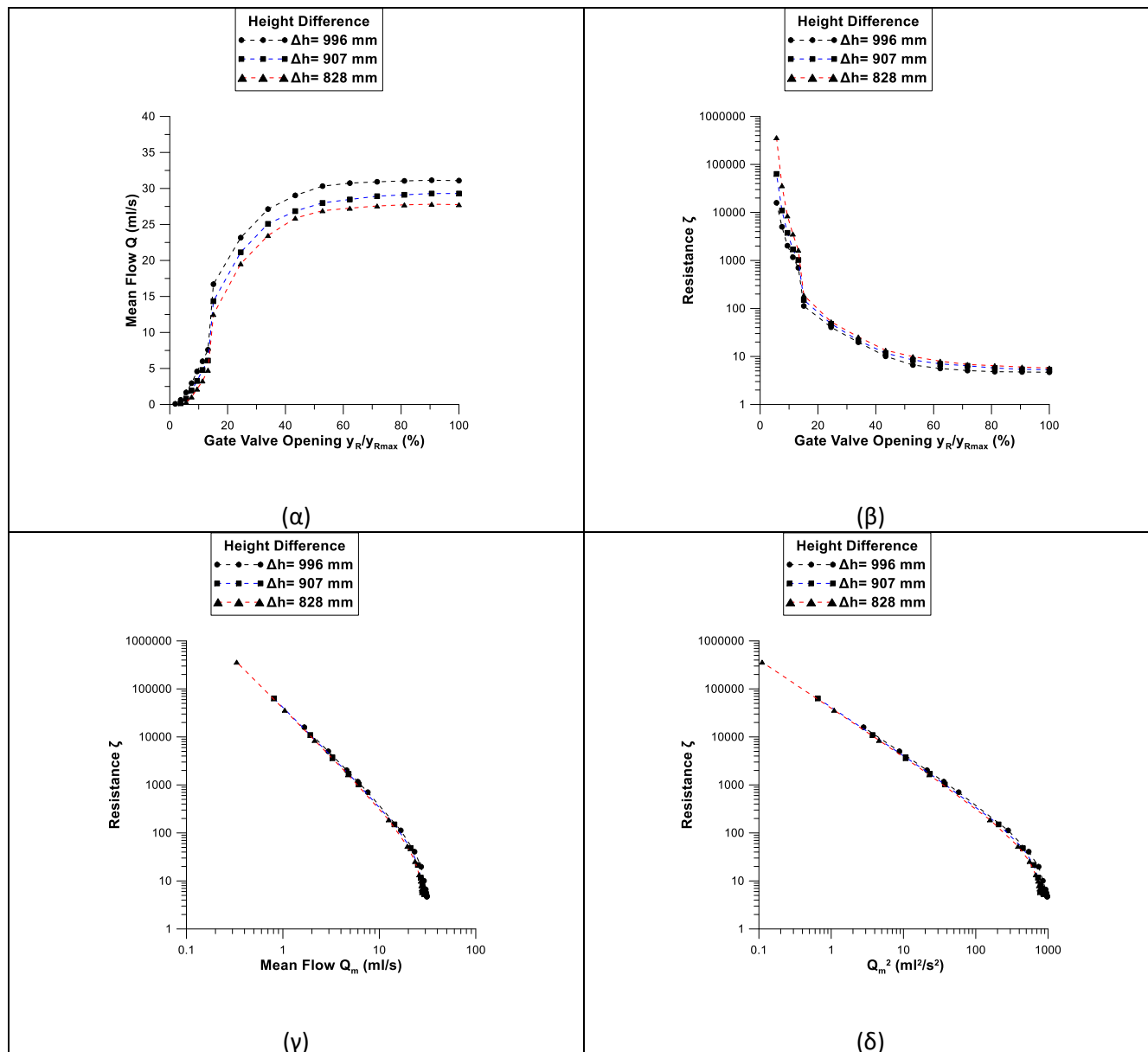
Κεφάλαιο 6: Αποτελέσματα

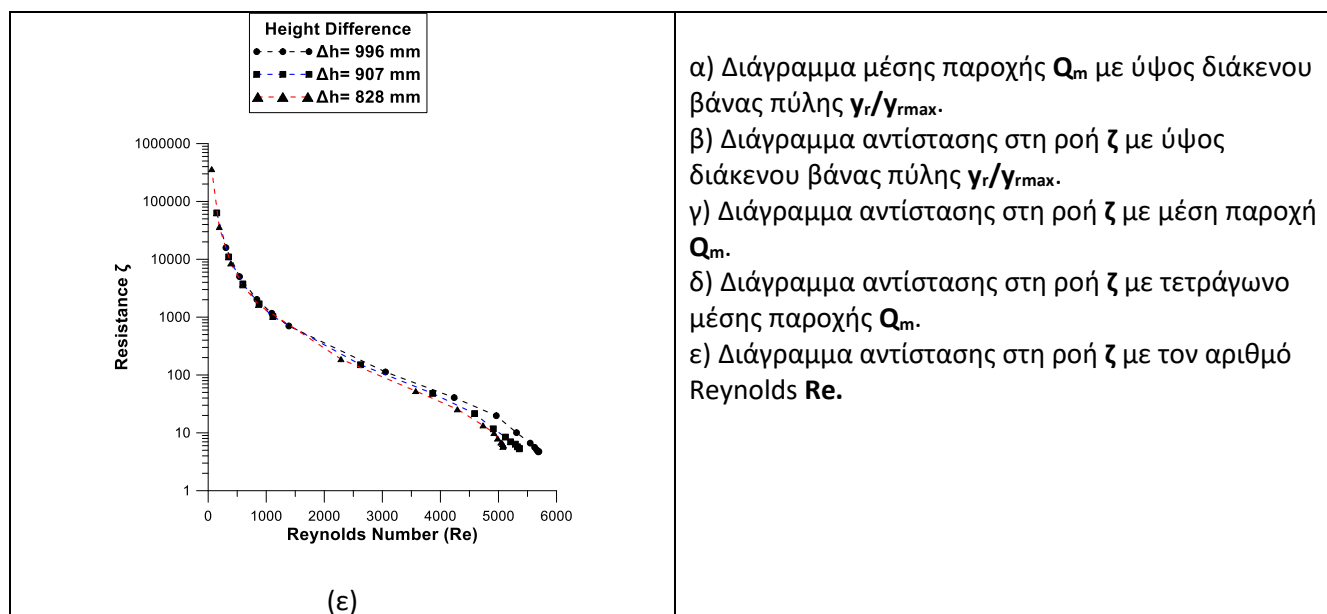
Σε αυτό το κεφάλαιο παραθέτονται διαγράμματα μεγθών και συμμεταβολής παραμέτρων που δημιουργήθηκαν από τα αποτελέσματα της ανάλυσης των μετρήσεων.

6.1 : Διαγράμματα μόνιμης ροής (Steady Flow)

Από τις μετρήσεις για μόνιμη ροή προκύπτουν τα παρακάτω διαγράμματα:

6.1-1 : Διαγράμματα μεγθών μόνιμης ροής





Σχήμα 6.1-1: Διαγράμματα μεγεθών για μόνιμη ροή για όλες τις διαφορές ύψους Δh μεταξύ των δοχείων.

Σχόλια:

Στα παραπάνω διαγράμματα απεικονίζονται αποτελέσματα μετρήσεων μόνιμης ροής για τρία διαφορετικά ύψη Δh . Όπως είναι αναμενόμενο η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του Δh και μειώνεται με κλείσιμο της βάνας πύλης. Αντίθετα η αντίσταση στη ροή ζ αυξάνεται με το κλείσιμο της βάνας και με την μείωση του ύψους Δh . Ο λόγος των παροχών για τις διάφορες υψομετρικές διαφορές είναι ανάλογος της τετραγωνικής ρίζας του λόγου των υψομετρικών διαφορών. Για παράδειγμα $(996/828)^{0.5}=1.1$ δηλαδή η διαφορά των παροχών είναι 10% που φαίνεται στα διαγράμματα (α) και (γ). Αυτό εξηγείται με τον τύπο για την αντίσταση στη ροή (5.2-9) σύμφωνα με τον οποίο η αντίσταση στη ροή αυξάνεται με την μείωση της παροχής. Ανάλογα αποτελέσματα φαίνεται να έχει και η μείωση του αριθμού Reynolds Re .

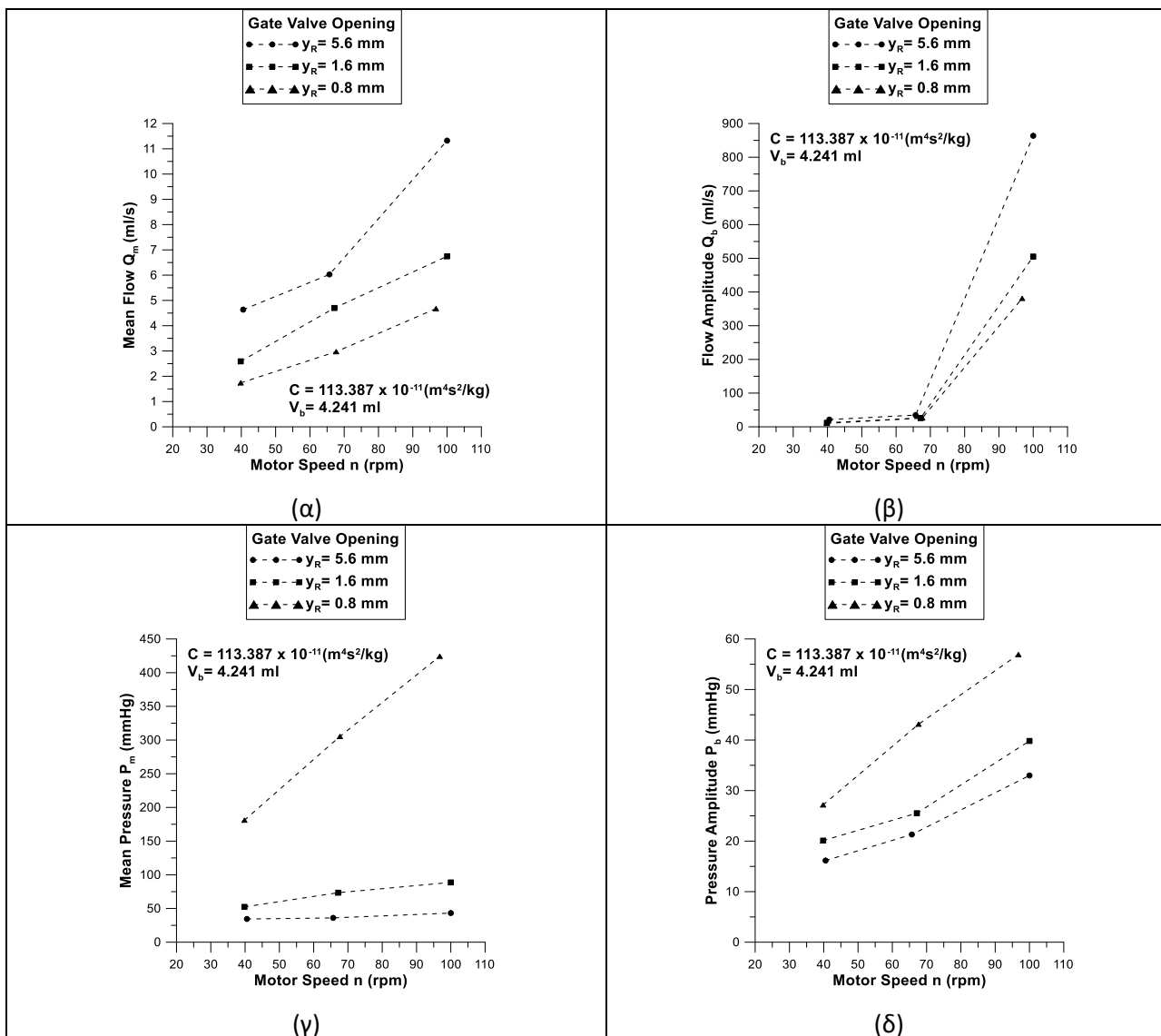
6.2 : Διαγράμματα μη μόνιμης ροής

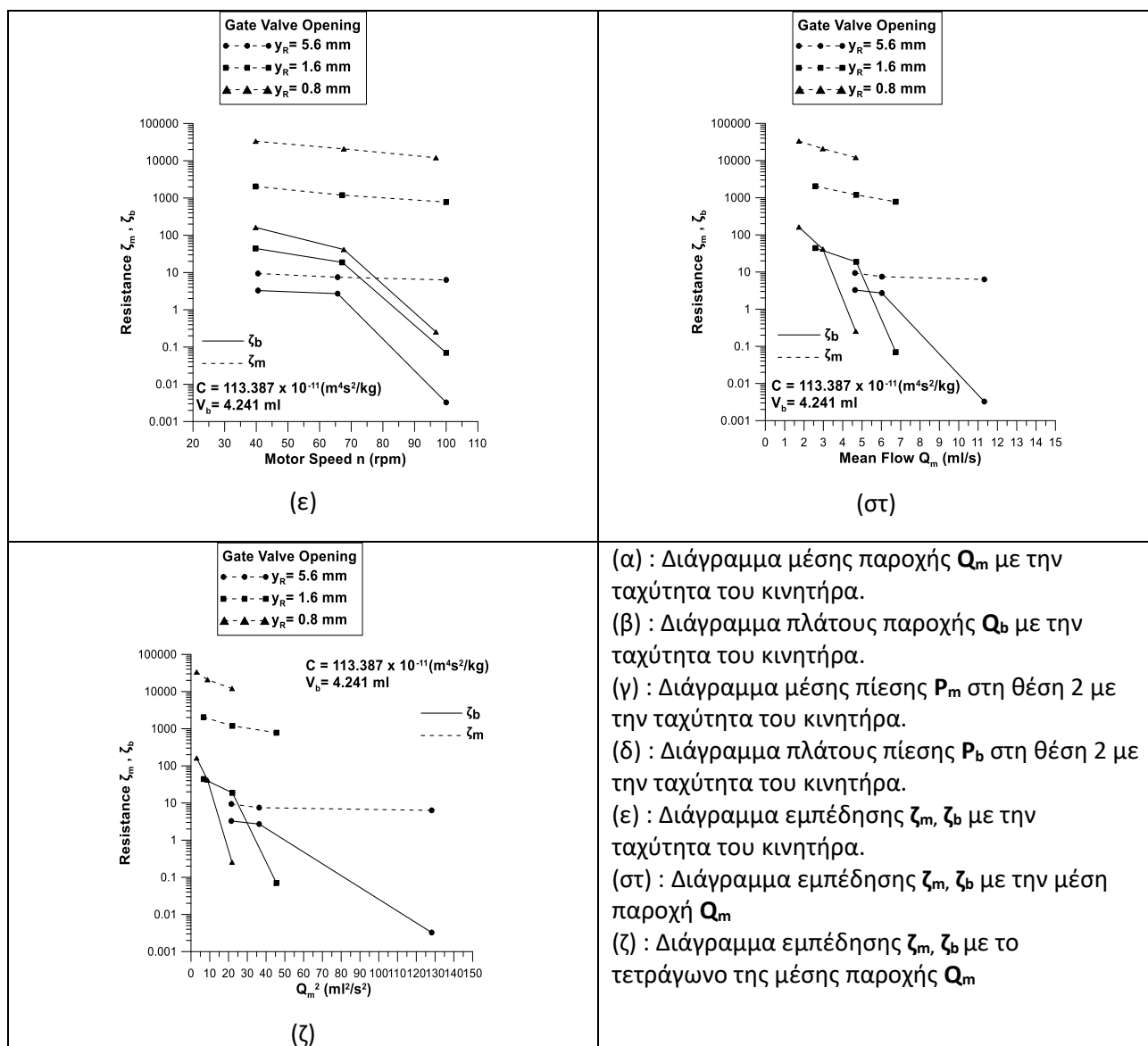
Ακολουθούν διαγράμματα μεγεθών για όλους τους συνδυασμούς παραμέτρων που αναφέρθηκαν στην παράγραφο 5.1-2, με εξαίρεση το ύψος διακένου βάνας πύλης y_R για το οποίο έχουν επιλεχθεί 3 χαρακτηριστικές τιμές (0,4mm, 0,8mm και 2.8mm)

Τα ακόλουθα διαγράμματα αφορούν τα εξής μεγέθη για κάθε μέτρηση:

- Διάγραμμα μέσης παροχής Q_m με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα πλάτους παροχής Q_b με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα μέσης πίεσης P_m στη θέση 2 με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα πλάτους πίεσης P_b στη θέση 2 με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα εμπέδησης ζ_m, ζ_b με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα εμπέδησης ζ_m, ζ_b με την μέση παροχή Q_m
- Διάγραμμα εμπέδησης ζ_m, ζ_b με το τετράγωνο της μέσης παροχής Q

6.2-1 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241 \text{ ml}$.





Σχήμα 6.2-1: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2 / \text{kg}$) και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.

Σχόλια :

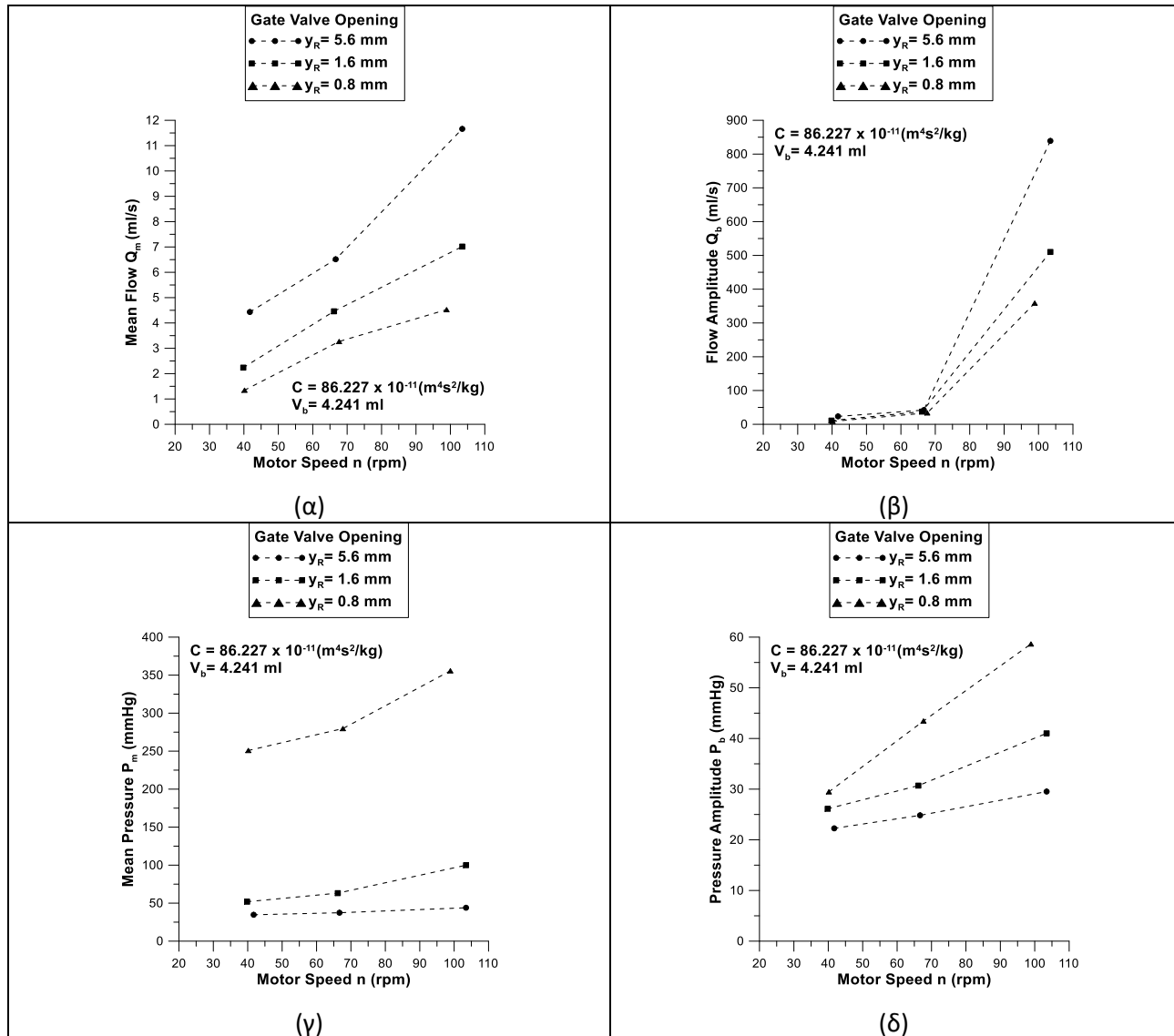
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-1) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=4,241$ ml, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=113,387$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2 / \text{kg}$), έχοντας όγκο αέρα $V_a=116,6316$ ml στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

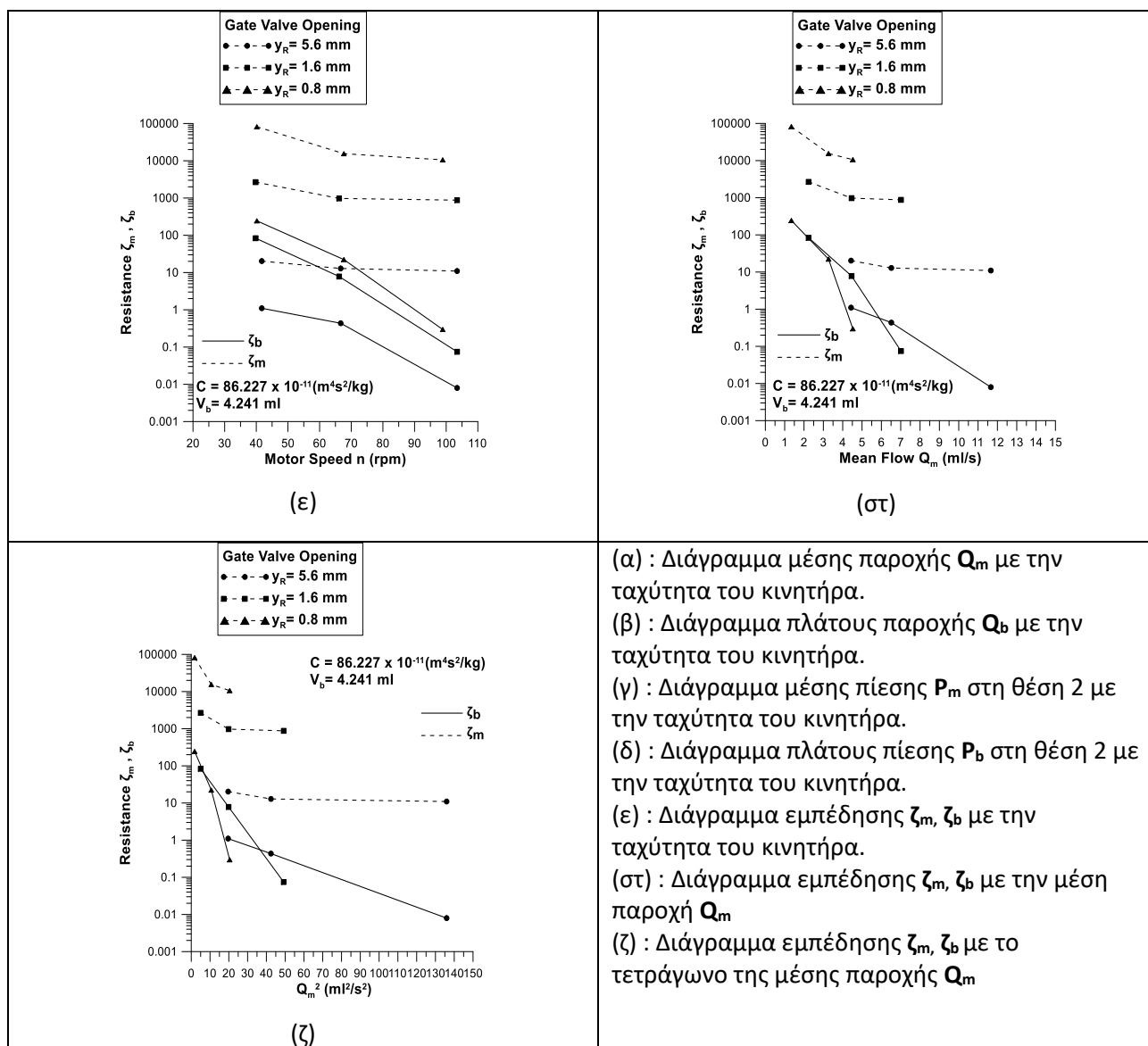
Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 96,8-100 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (482,52 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 65,7-67,7 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (8,52 ml/s).

Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης, παρατηρείται ότι

η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδηση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.2-2 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227$ ($\times 10^{-11}$ m^4s^2/kg) και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.





Σχήμα 6.2-2: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2 / \text{kg}$) και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.

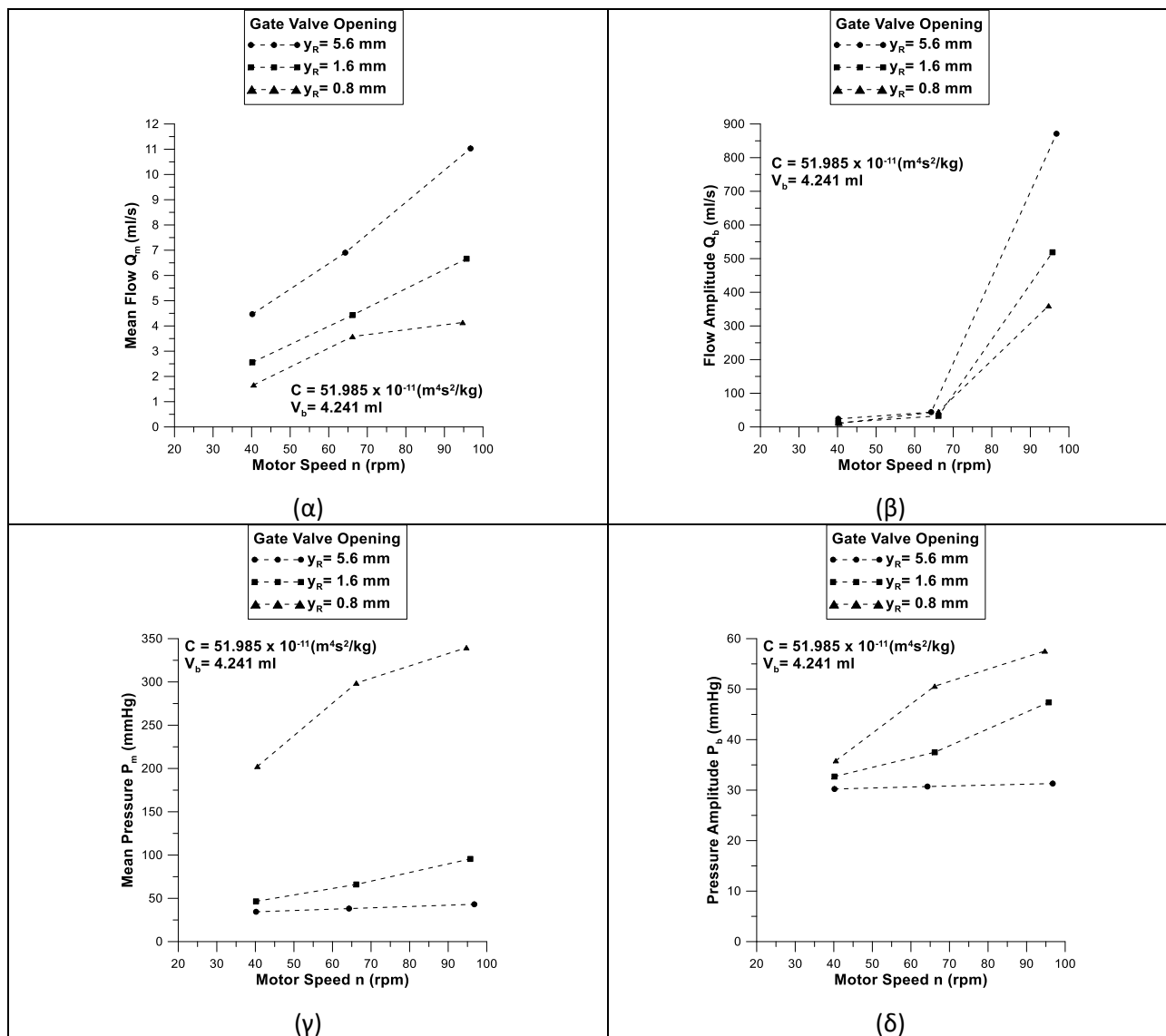
Σχόλια :

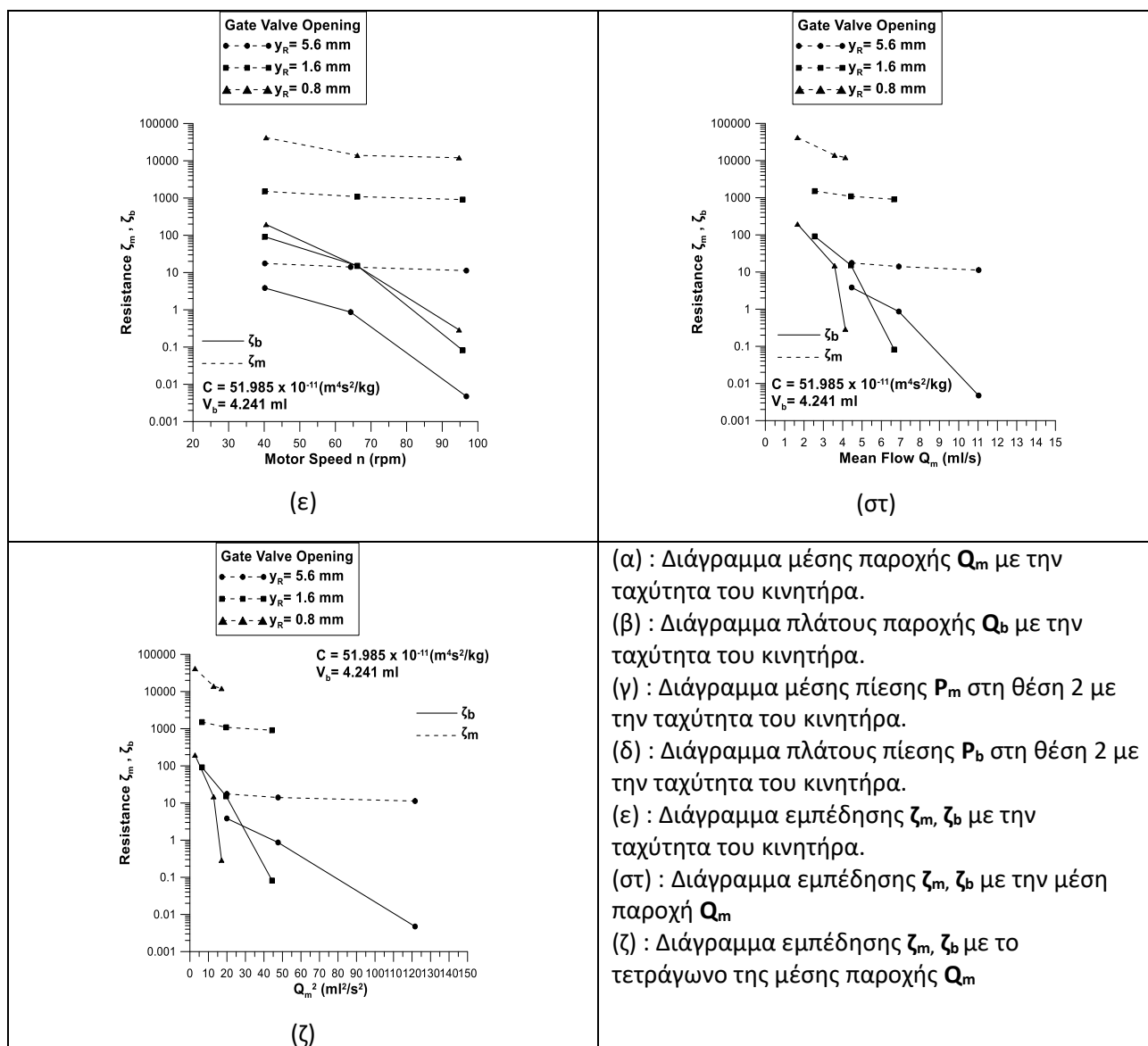
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-2) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=4,241$ ml, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C= 86,227$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2 / \text{kg}$), έχοντας όγκο αέρα $V_a= 88,3573$ ml στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 98,9-103,4 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (483,31 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 66,2-67,7 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (8,29 ml/s). Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος

πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδηση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.2-3 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985$ ($\times 10^{-11}$ m^4s^2/kg) και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.





Σχήμα 6.2-3: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$) και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.

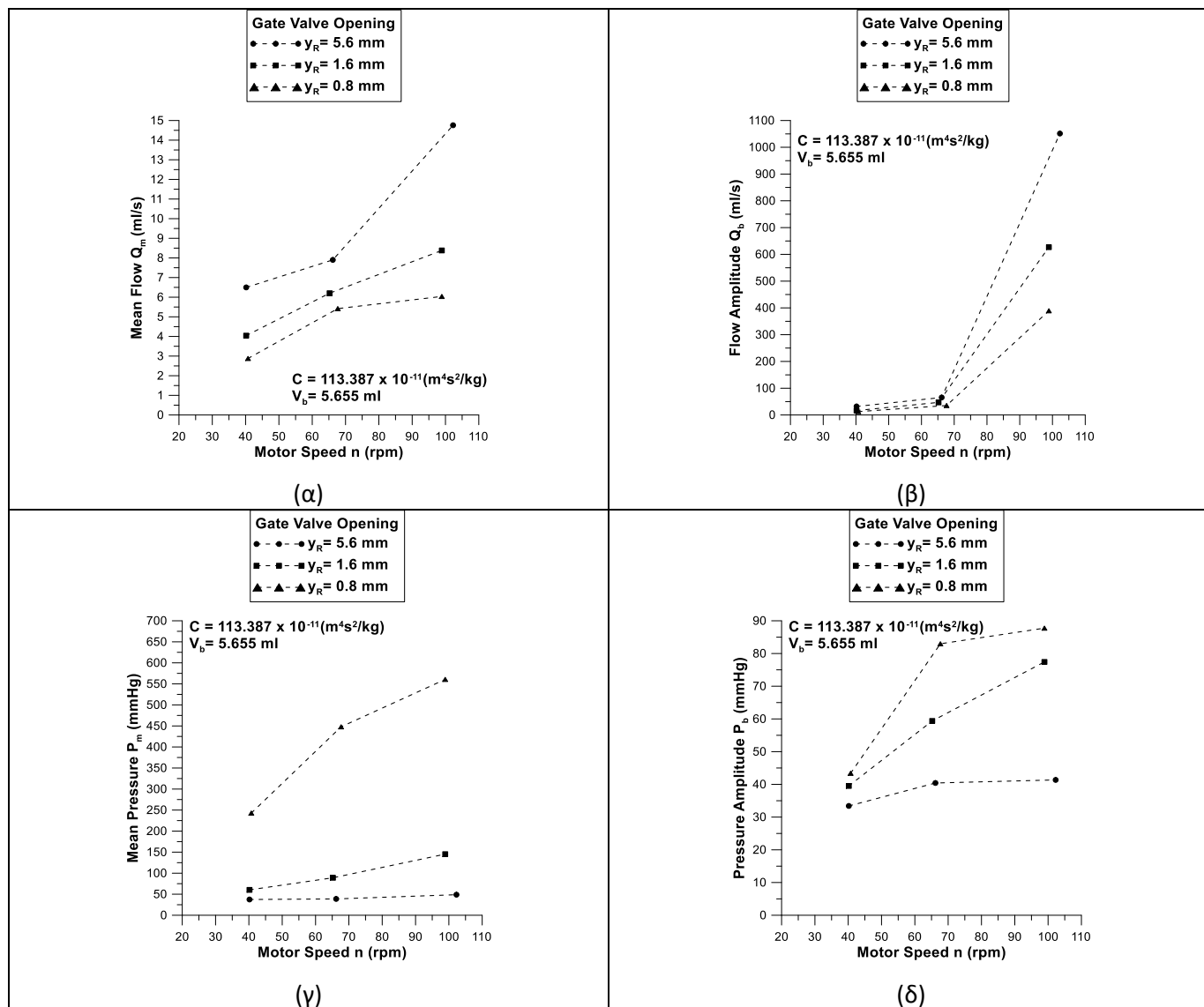
Σχόλια :

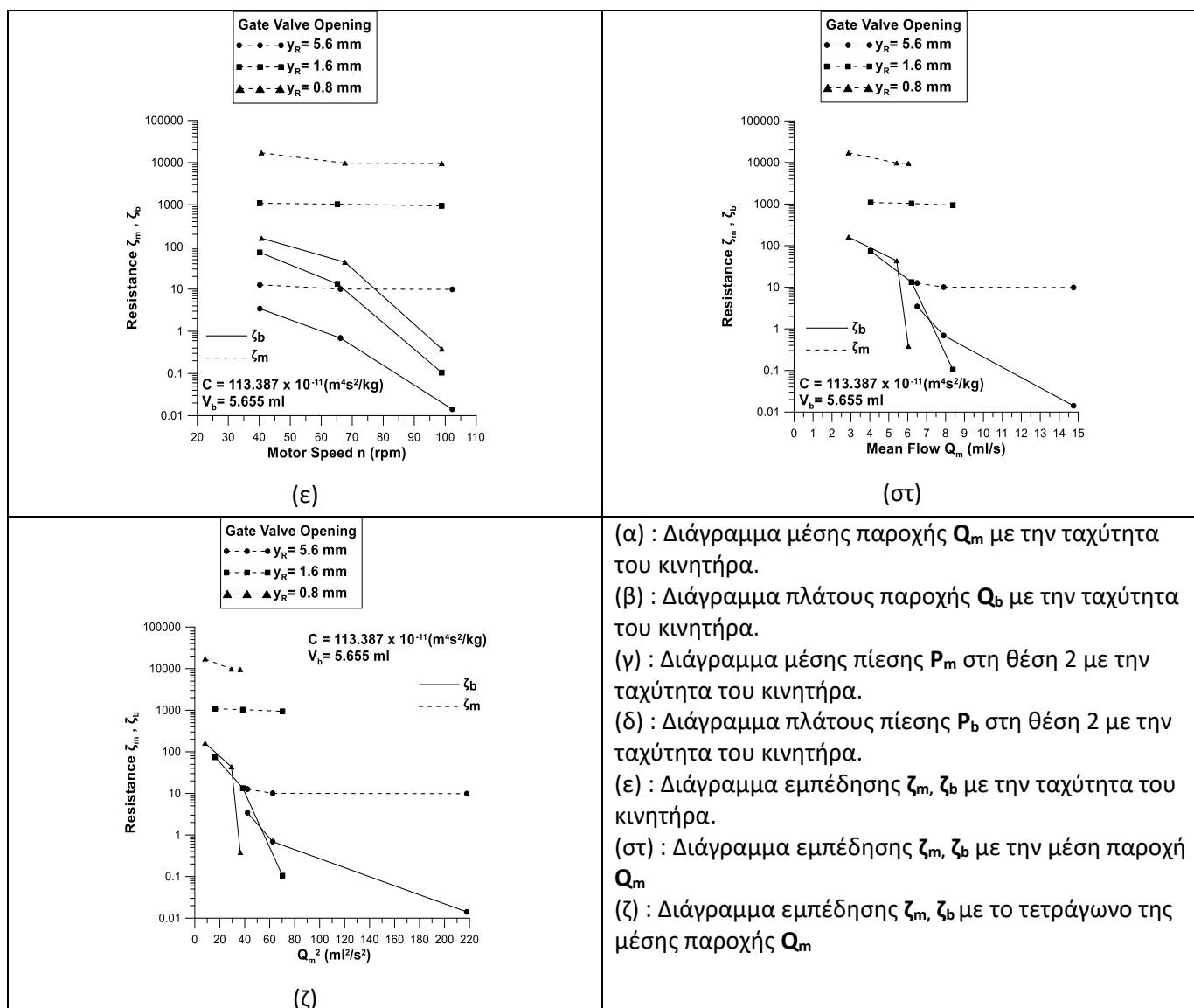
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-3) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=4,241$ ml, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C= 51,985$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$), έχοντας όγκο αέρα $V_a= 53,0144$ ml στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 94,7-96,8 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (511,16 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 64,3-66,2 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (9,14 ml/s). Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος

πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδηση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.2-4 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (}\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg})$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$.





Σχήμα 6.2-4: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$.

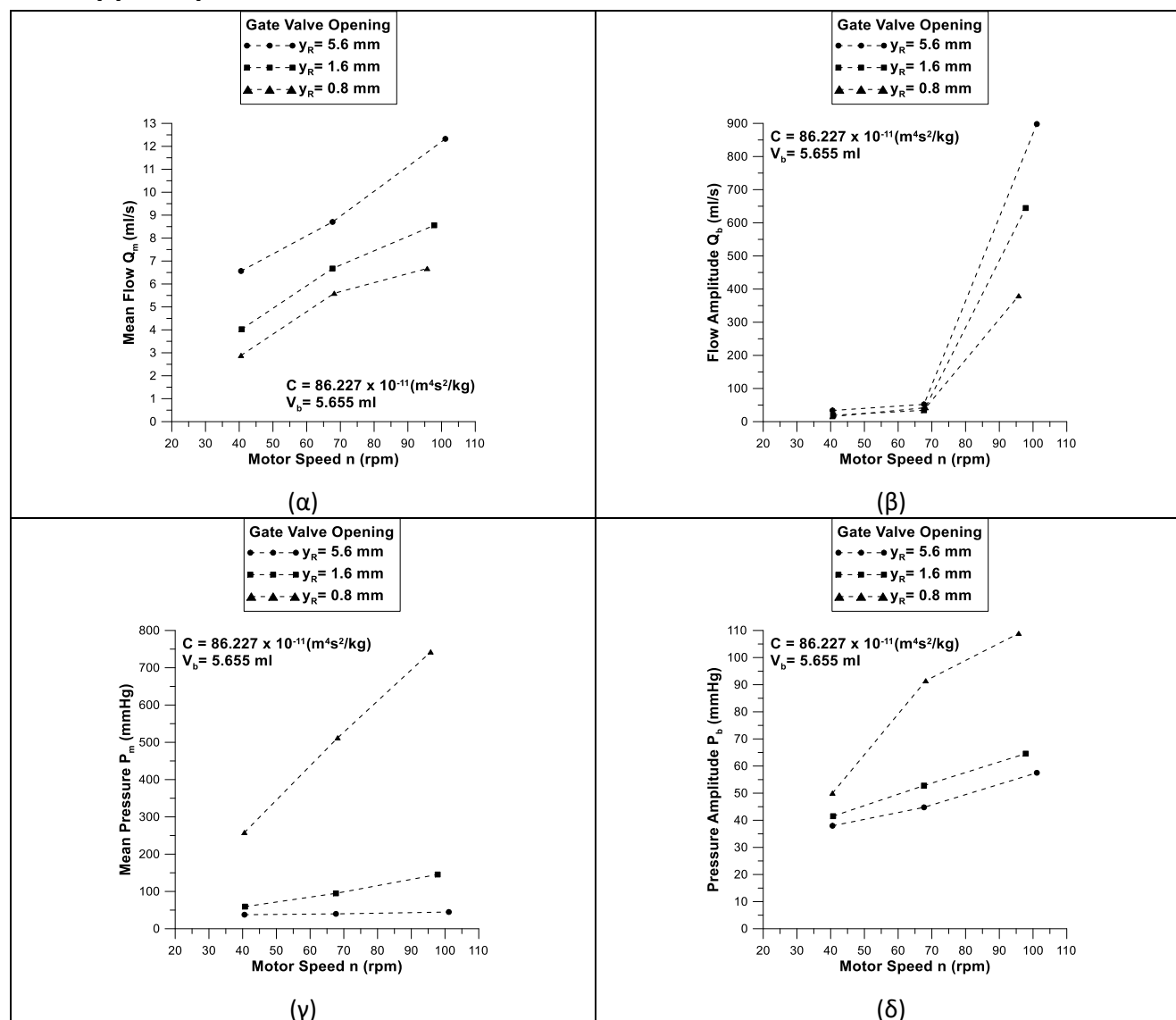
Σχόλια :

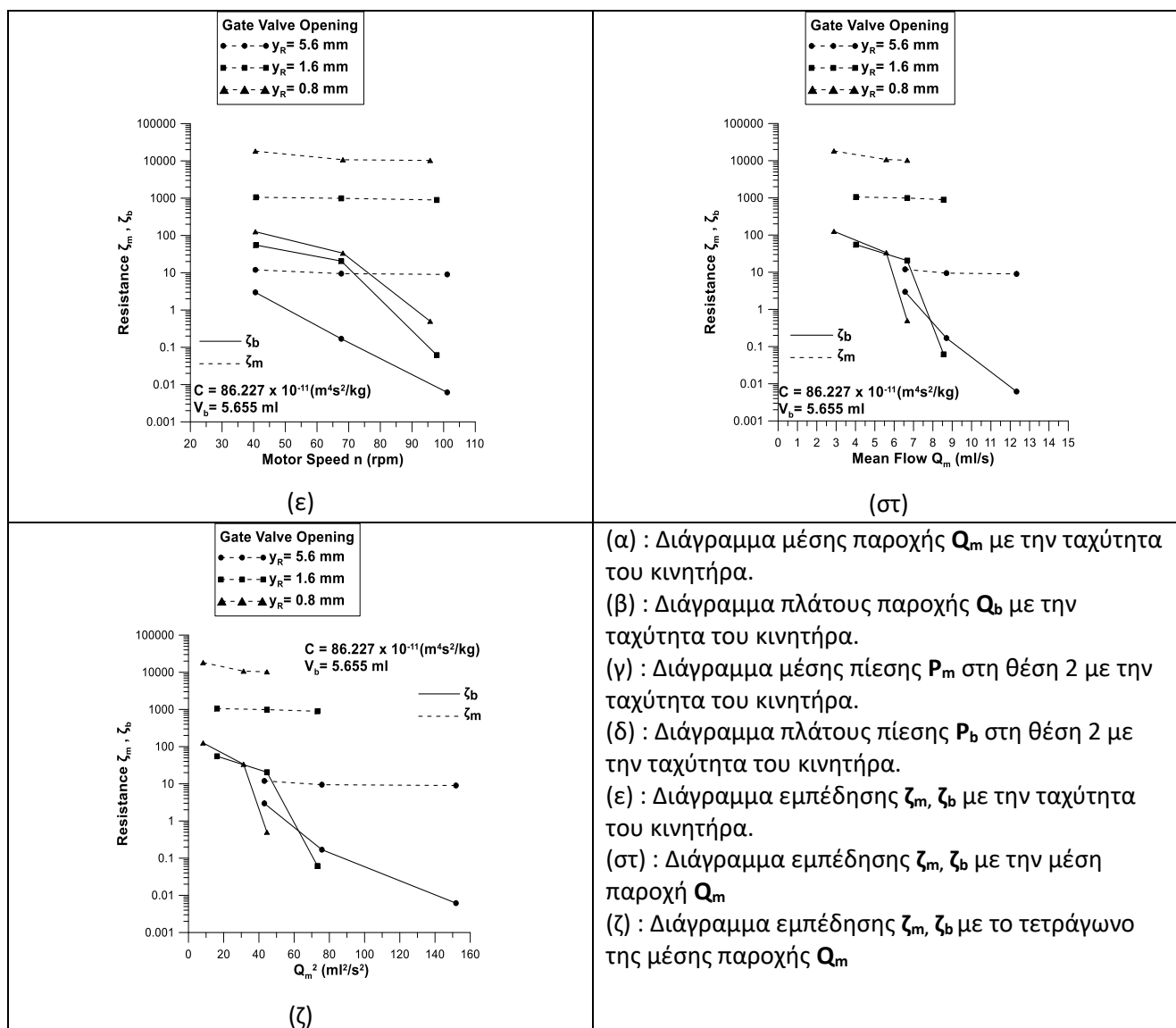
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-4) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=5,655 \text{ ml}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=113,387 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$, έχοντας όγκο αέρα $V_a=116,6316 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 98,9-102,3 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (662,08 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 65,2-67,7 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (30,04 ml/s). Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης,

παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδηση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.2-5 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227$ ($\times 10^{-11}$ m^4s^2/kg) και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655$ ml.





Σχήμα 6.2-5: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 (\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg})$ και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$.

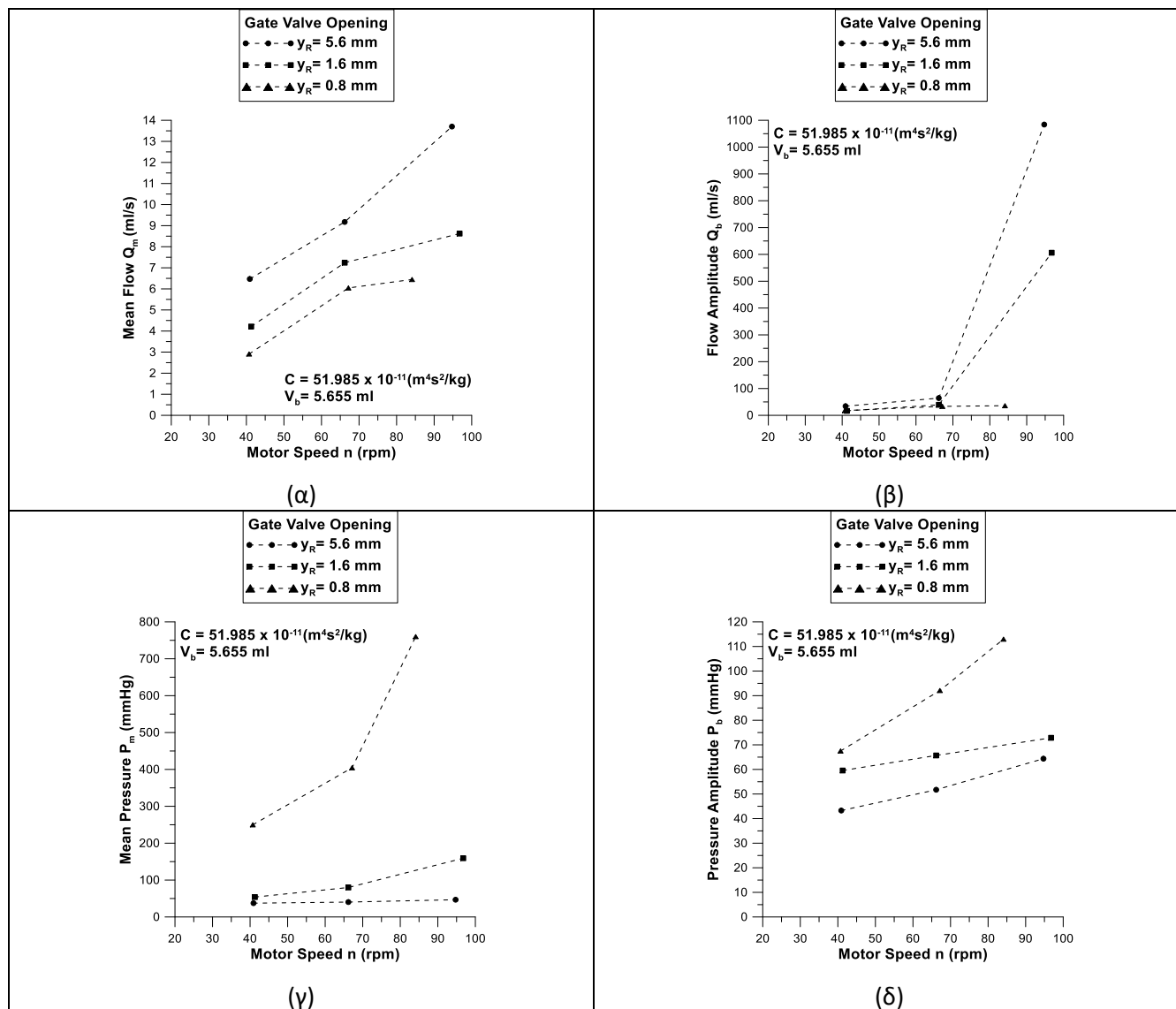
Σχόλια :

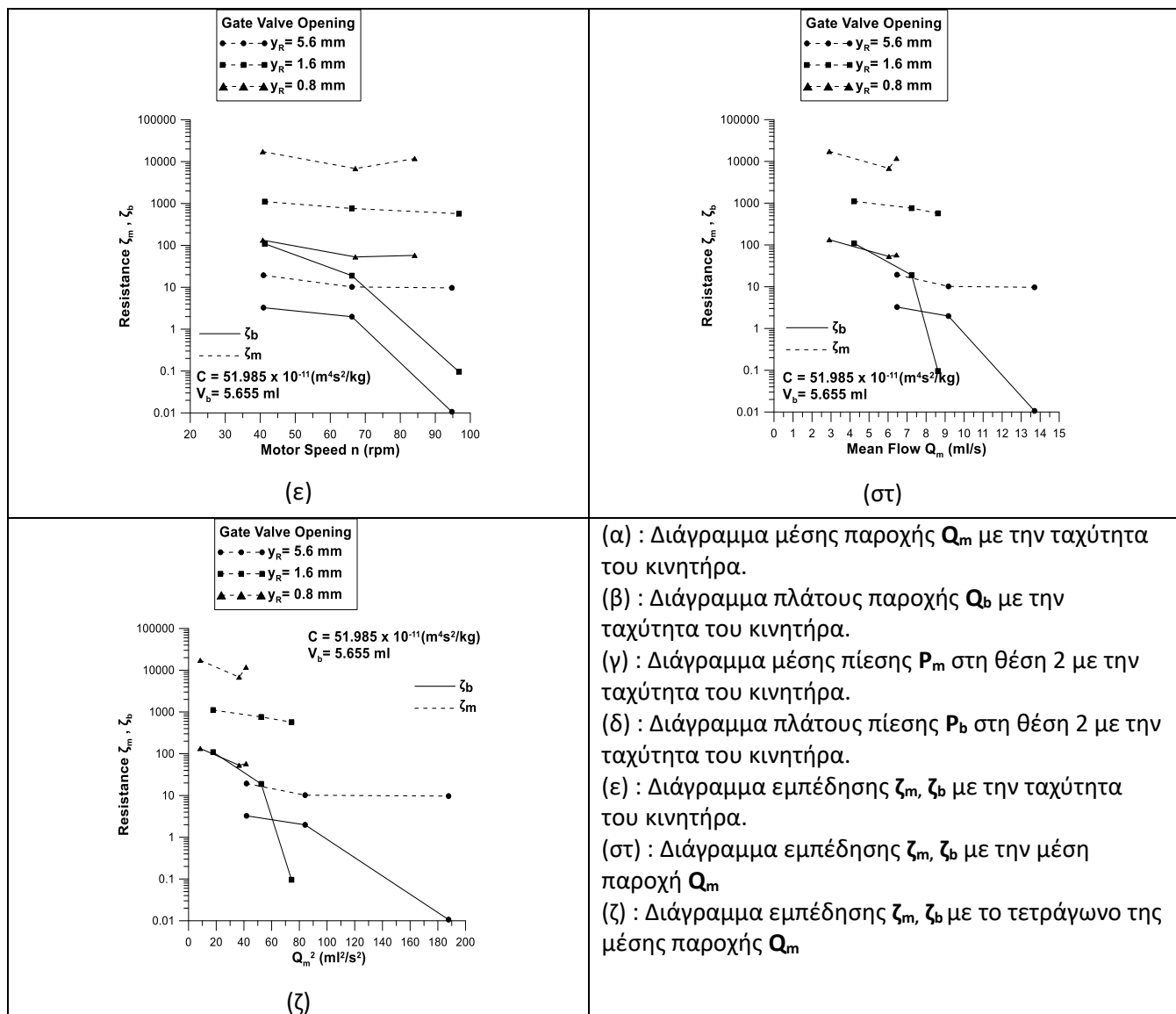
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-5) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=5,655 \text{ ml}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C= 86,227 (\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg})$, έχοντας όγκο αέρα $V_a= 88,3573 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 95,7-101,1 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (517,24 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 67,7-68,2 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (9,98 ml/s). Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος

πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδηση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Η μείωση αυτή είναι λιγότερο έντονη για χαμηλότερη αντίσταση στη ροή ($y_R=2.8\text{mm}$).

6.2-6 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$) και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655 \text{ ml}$.





Σχήμα 6.2-6: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$) και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655$ ml.

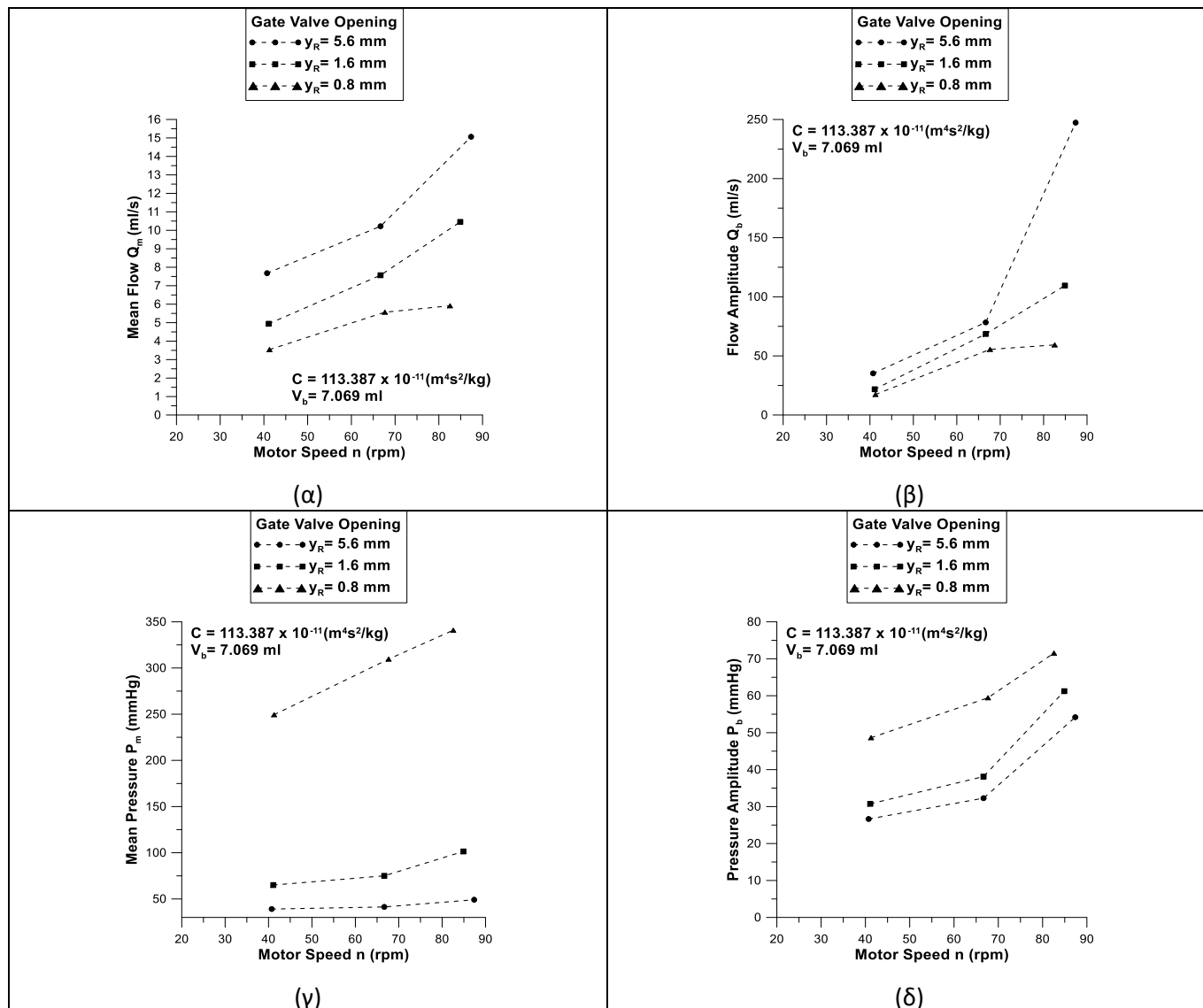
Σχόλια :

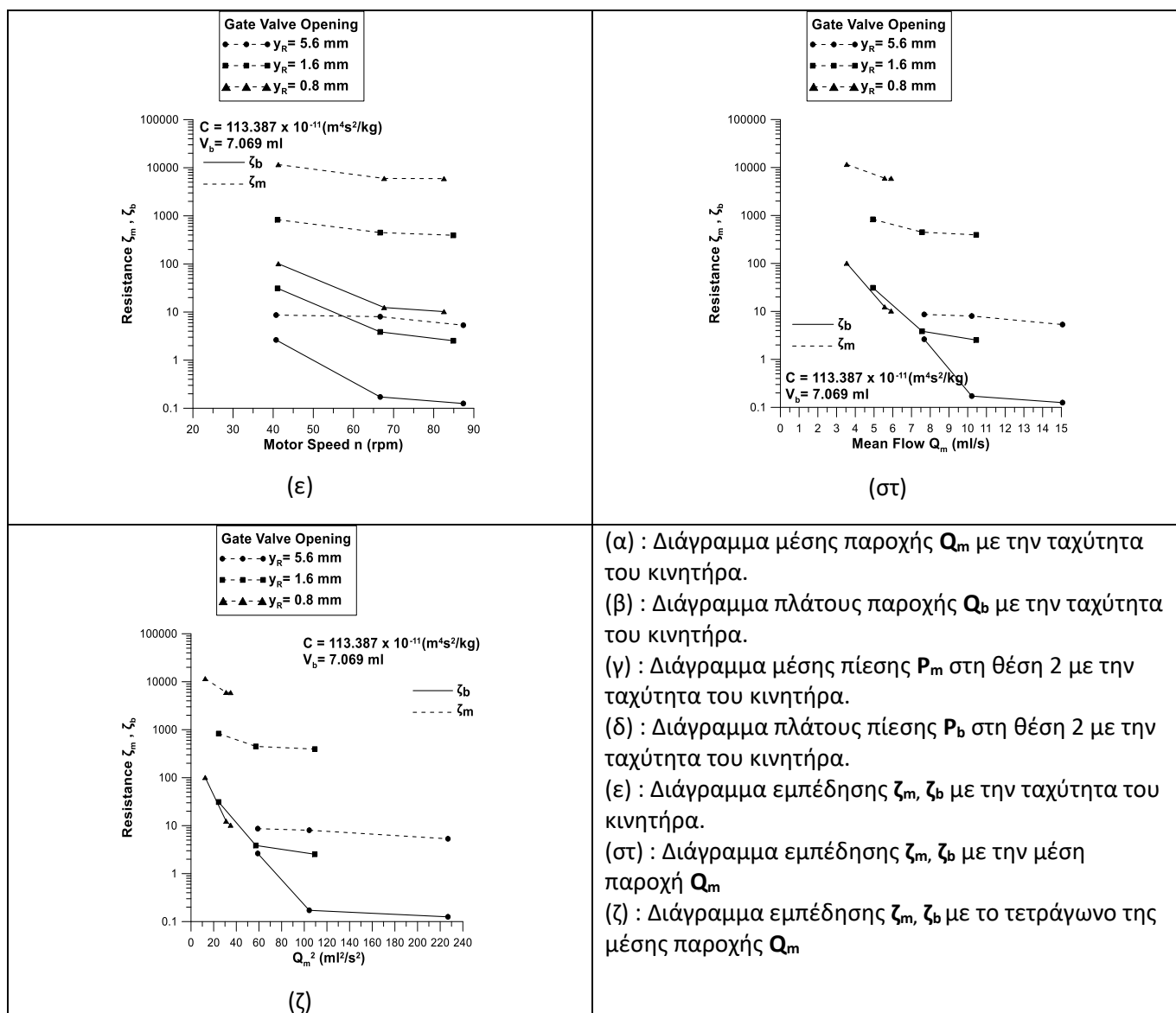
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-6) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=5,655$ ml, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C= 51,985$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$), έχοντας όγκο αέρα $V_a= 53,0144$ ml στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 84,1-94,7 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (1048,07 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 66,2-67,2 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (30,81 ml/s). Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης,

παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδηση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Η μείωση αυτή είναι λιγότερο έντονη για χαμηλότερη αντίσταση στη ροή ($y_R=2.8\text{mm}$).

6.2-7 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (}\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg})$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$.





Σχήμα 6.2-7: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg)}$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$.

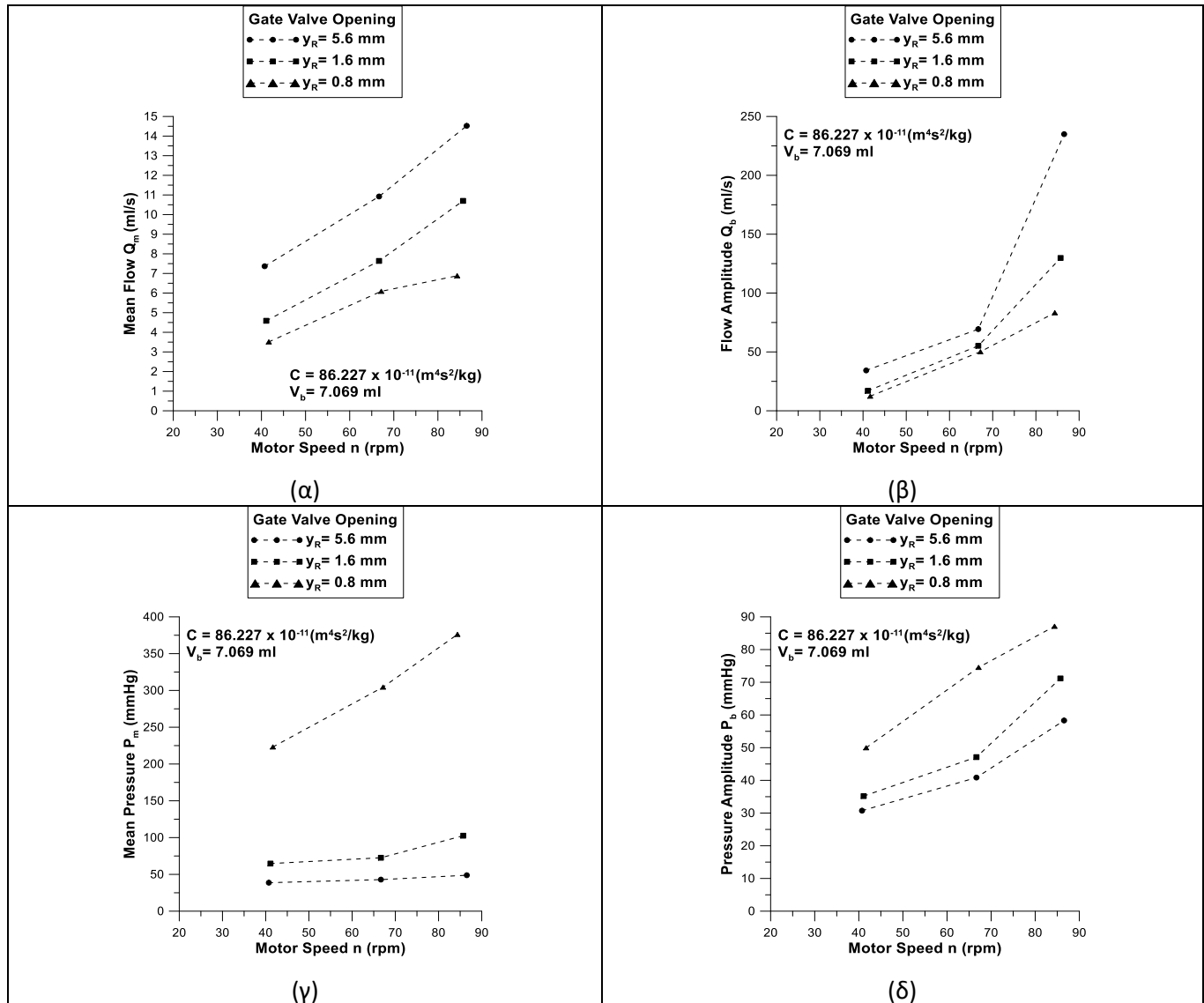
Σχόλια :

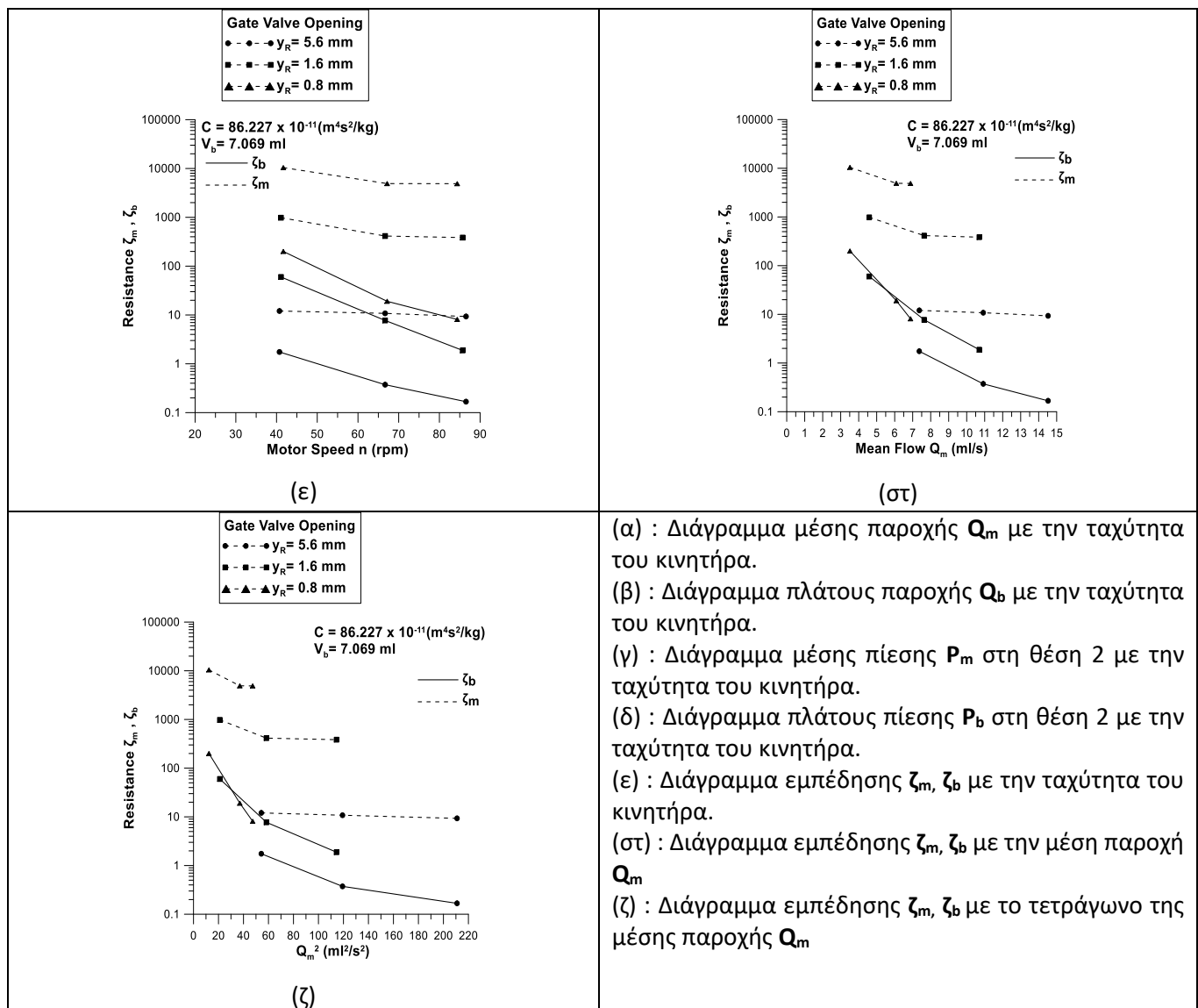
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-7) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=7,069 \text{ ml}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=113,387 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg)}$, έχοντας όγκο αέρα $V_a=116,6316 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι:, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 84,9-87,4 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (187,99 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 66,7-67,7 rpm) που είναι μικρότερο (22,82 ml/s). Η διαφορά αυτή είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση

αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδηση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.2-8 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \text{ (}\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg})$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$.





Σχήμα 6.2-8: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$) και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069$ ml.

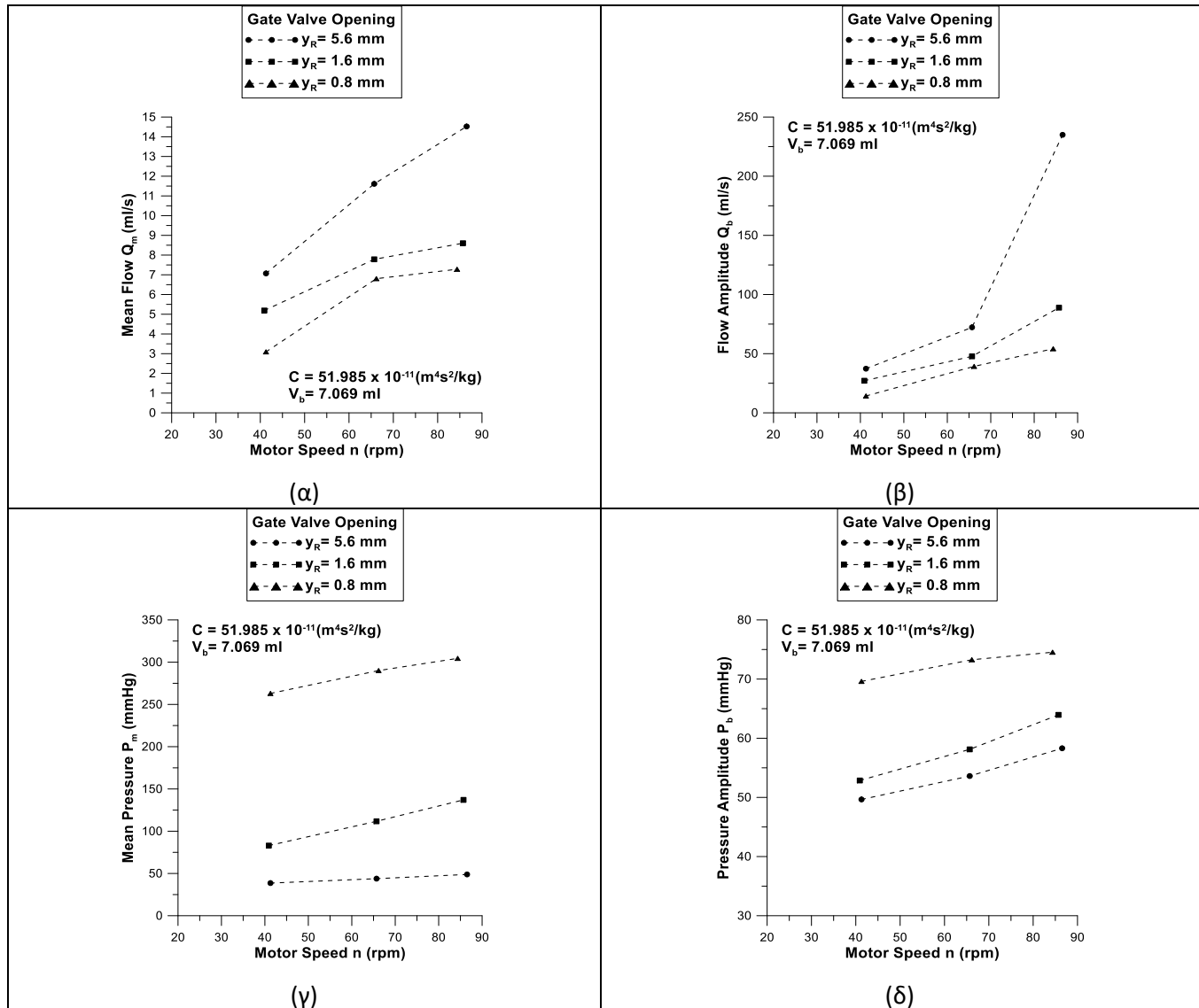
Σχόλια :

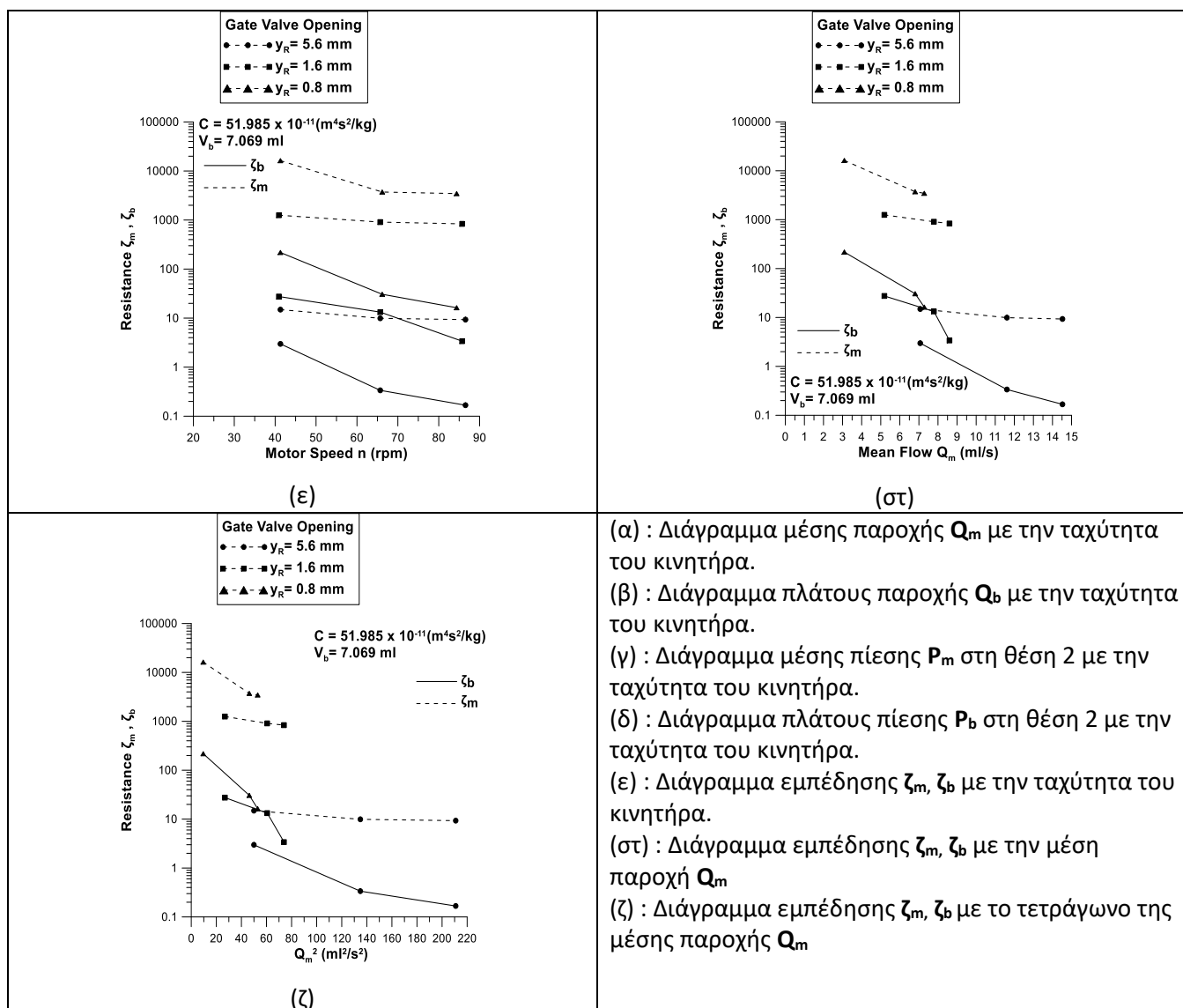
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.1-8) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b= 7,069$ ml, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C= 86,227$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$), έχοντας όγκο αέρα $V_a= 88,3573$ ml στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. ο πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 84,4-86,2 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (171,59 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 66,7-67,2 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (19,18 ml/s). Η διαφορά αυτή είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης, παρατηρείται ότι

η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδηση ζ_m, ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.2-9 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985$ ($\times 10^{-11}$ m^4s^2/kg) και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069$ ml.





Σχήμα 6.2-9: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 (\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg})$ και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$.

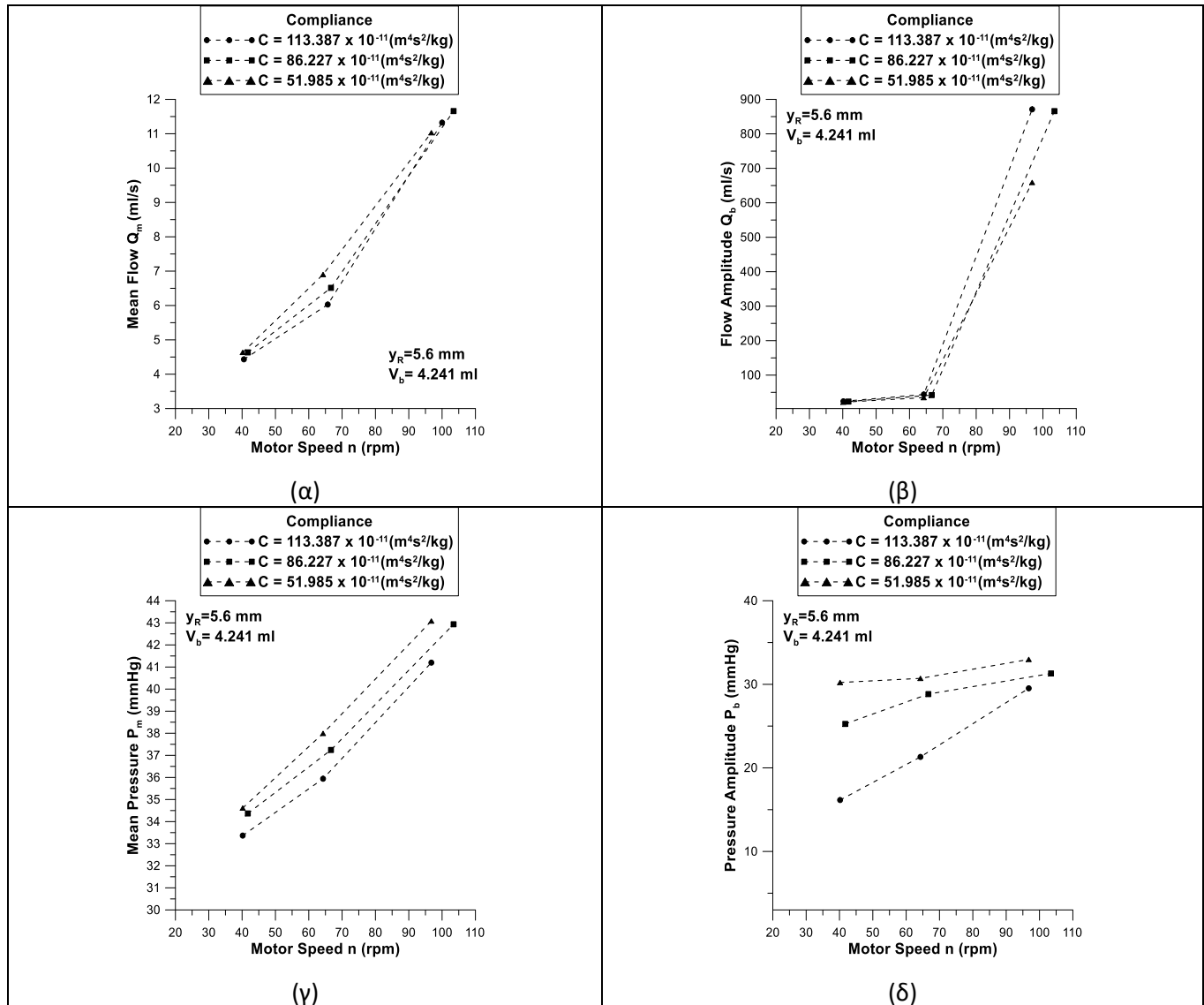
Σχόλια :

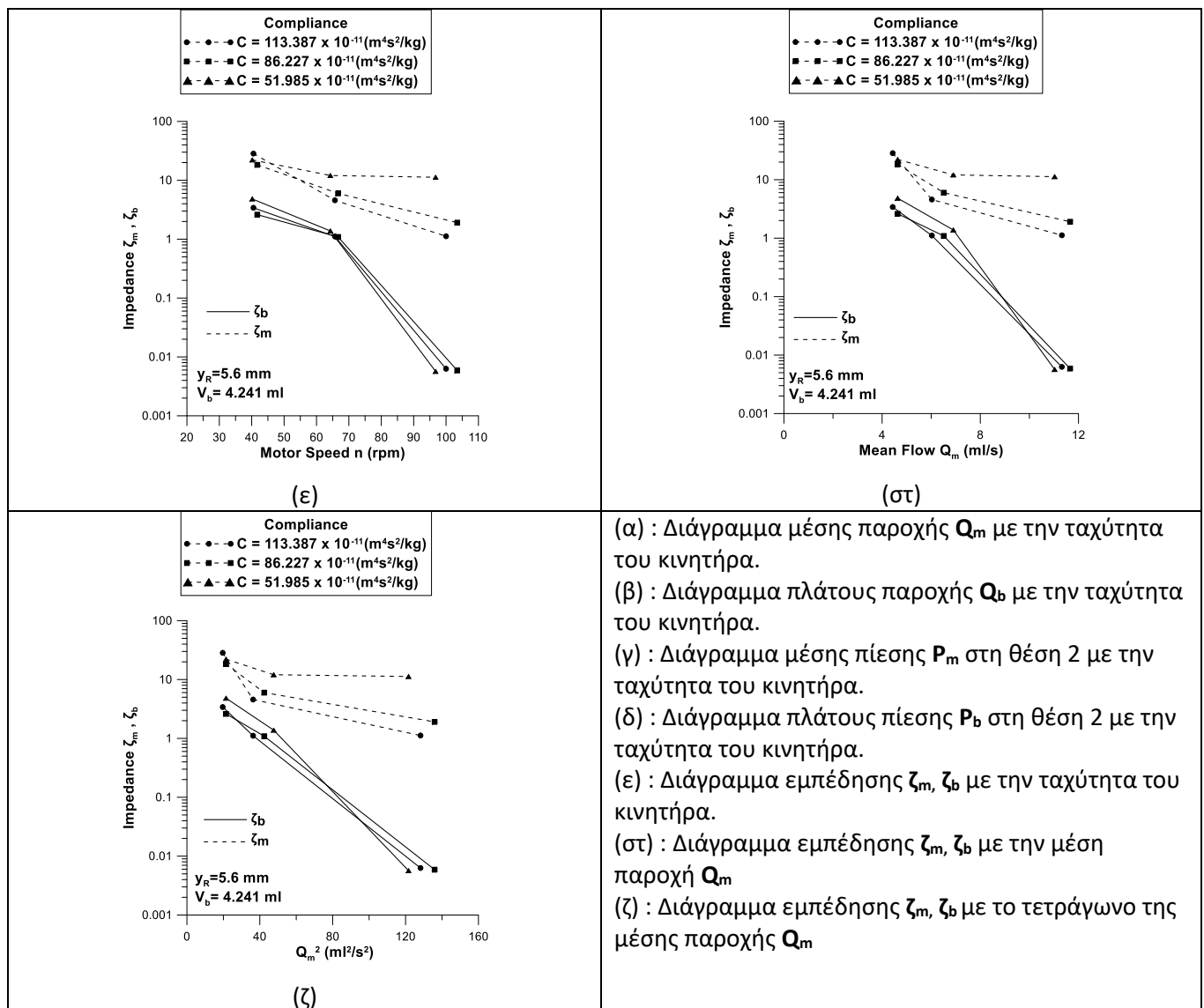
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-9) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=7,069 \text{ ml}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=51,985 (\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg})$, έχοντας όγκο αέρα $V_a=53,0144 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 83,2-86,5 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (180,82 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 65,7-66,2 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (30,98 ml/s). Η διαφορά αυτή είναι εμφανώς μικρότερη σε σχέση με μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα για το μικρότερο διάκενο βάνας πύλης y_R . Επίσης, παρατηρείται ότι

η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Η εμπέδωση ζ_m, ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που η ενδοτικότητα διατηρείται σταθερή, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.2-10 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6$ mm και όγκο εμβολισμού $V_b = 4,241$ ml.





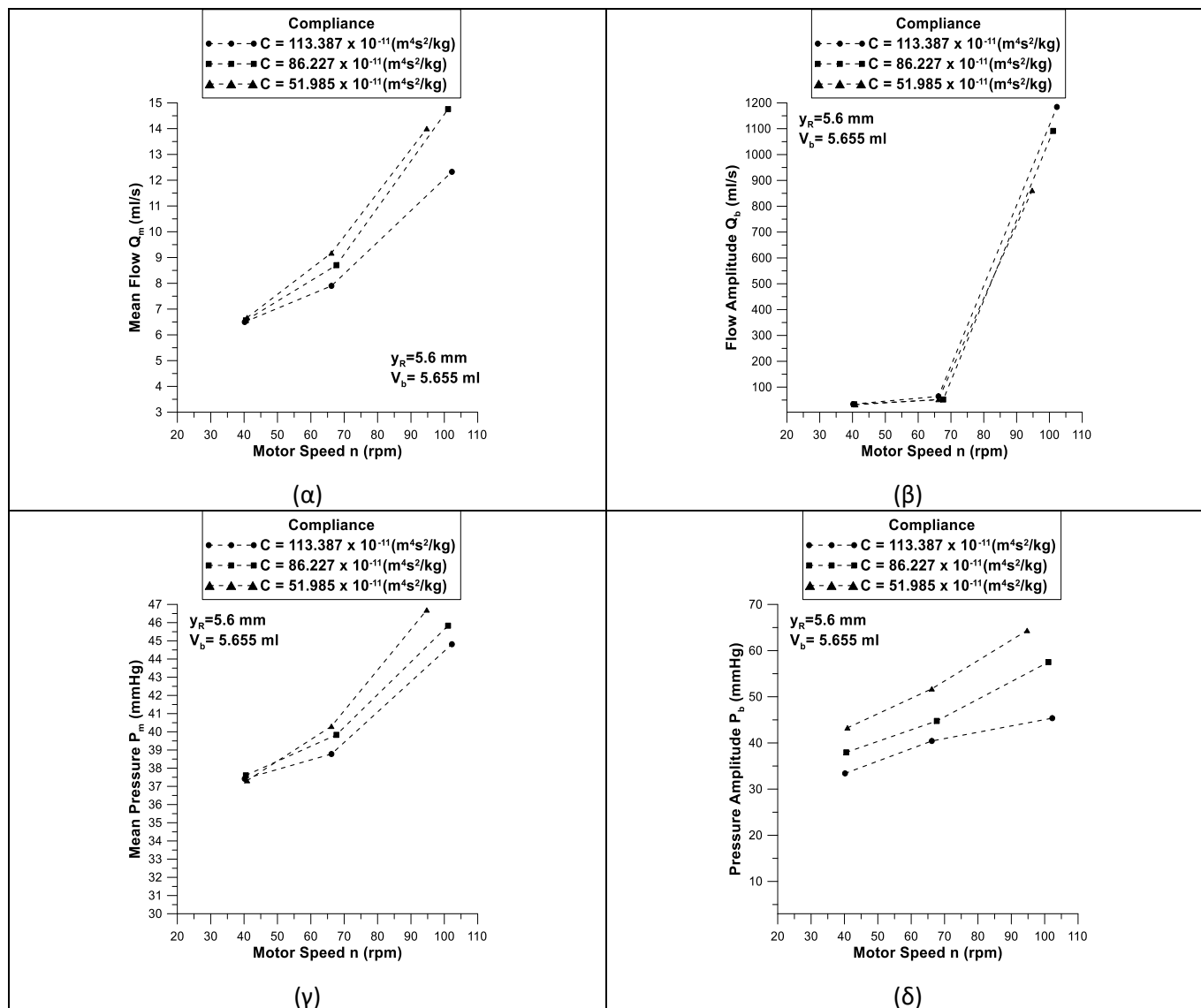
Σχήμα 6.2-10: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 4,241 \text{ ml}$.

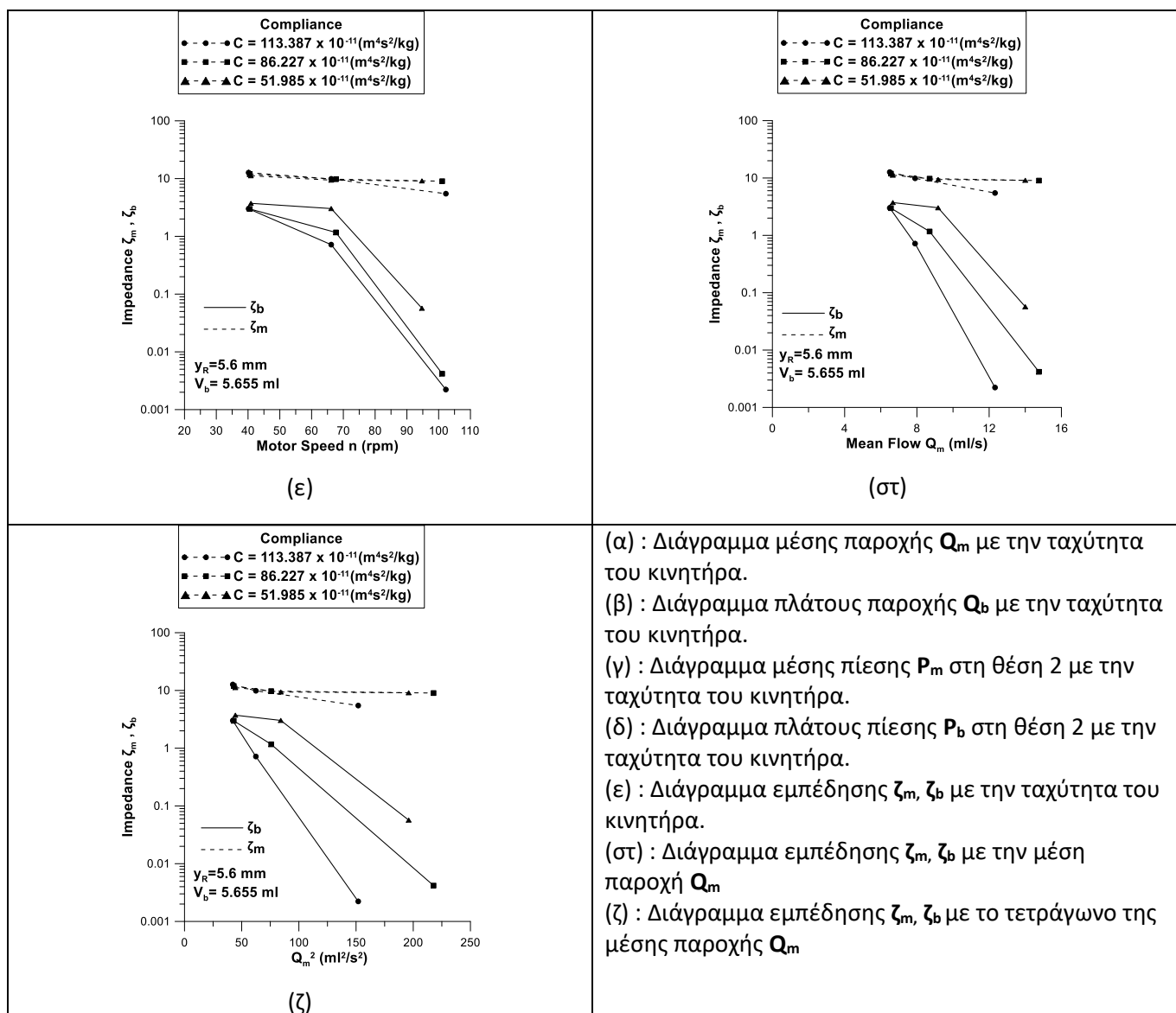
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (**Σχ. 6.2-10**) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b = 4,241 \text{ ml}$. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα με μεγαλύτερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Η εμπίεδηση ζ_m, ζ_b αυξάνεται με μείωση της ενδοτικότητας C . Οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι

πολύ μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 10,93 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-11 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6$ mm και όγκο εμβολισμού $V_b = 5,655$ ml.





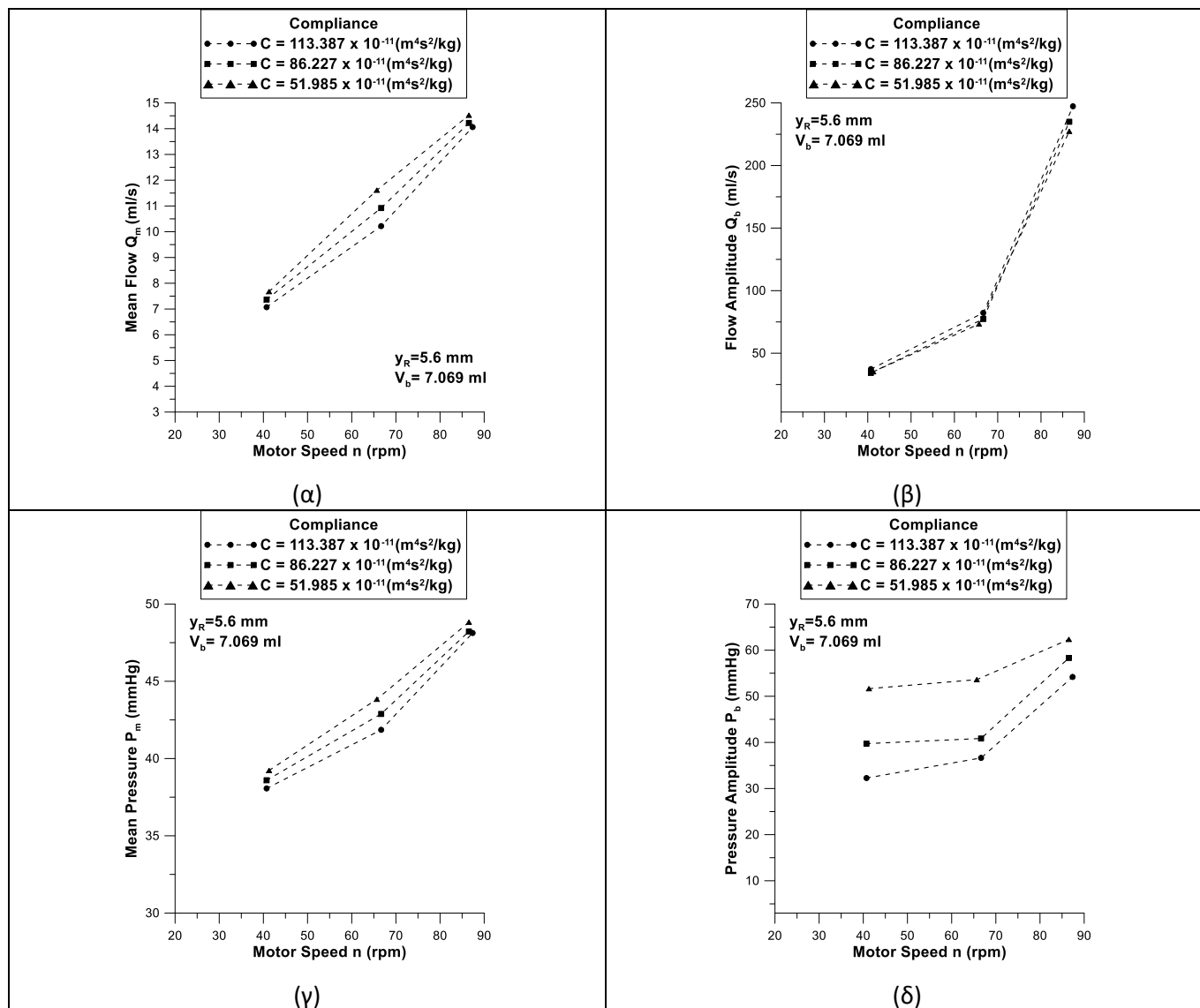
Σχήμα 6.2-11: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 5,655 \text{ ml}$.

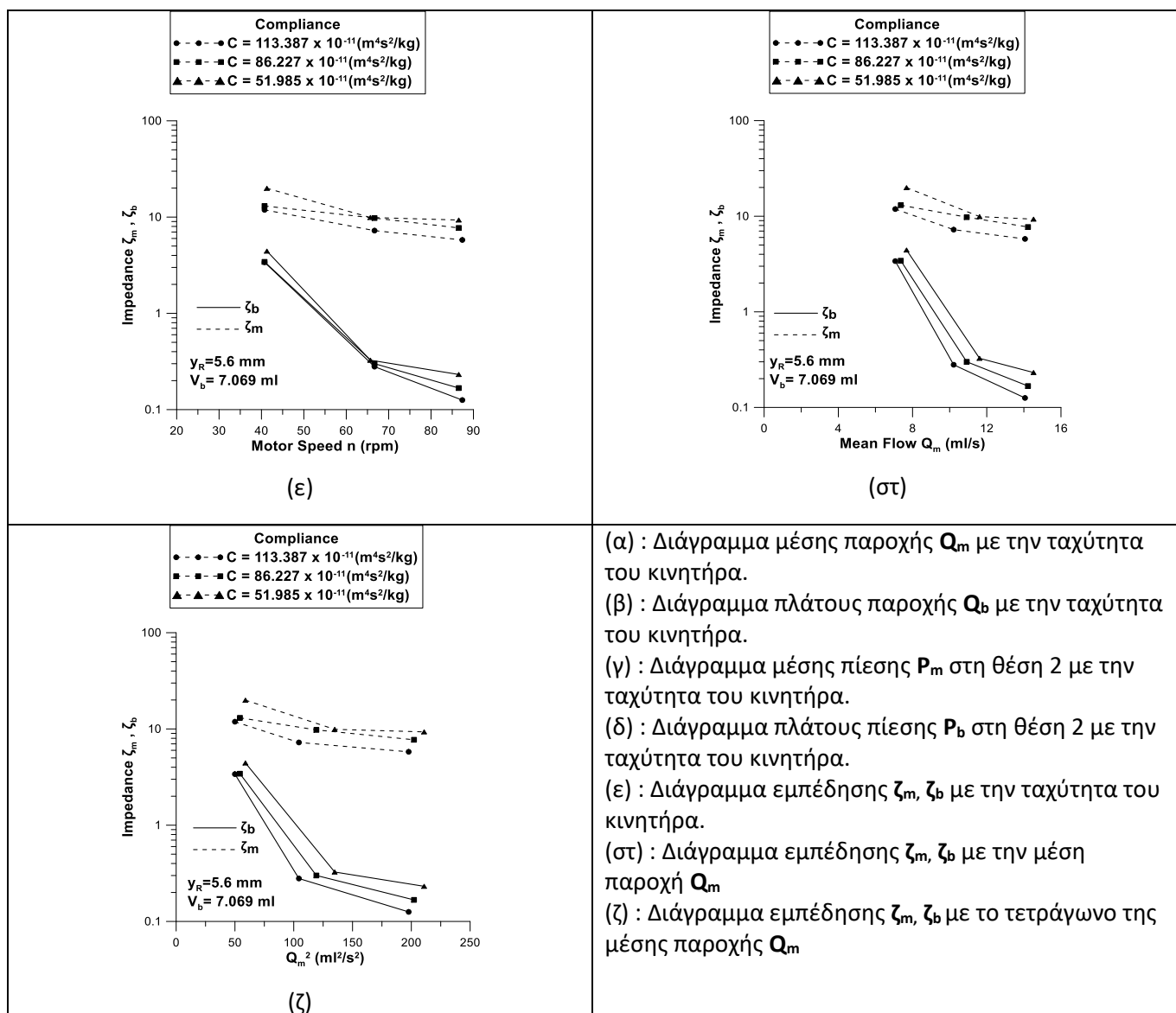
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (**Σχ. 6.2-11**) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b = 5,655 \text{ ml}$. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα με μεγαλύτερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Η εμπίεδηση ζ_m, ζ_b αυξάνεται με μείωση της ενδοτικότητας C . Οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι

πολύ μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 7,19 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-12 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6$ mm και όγκο εμβολισμού $V_b = 7,069$ ml.





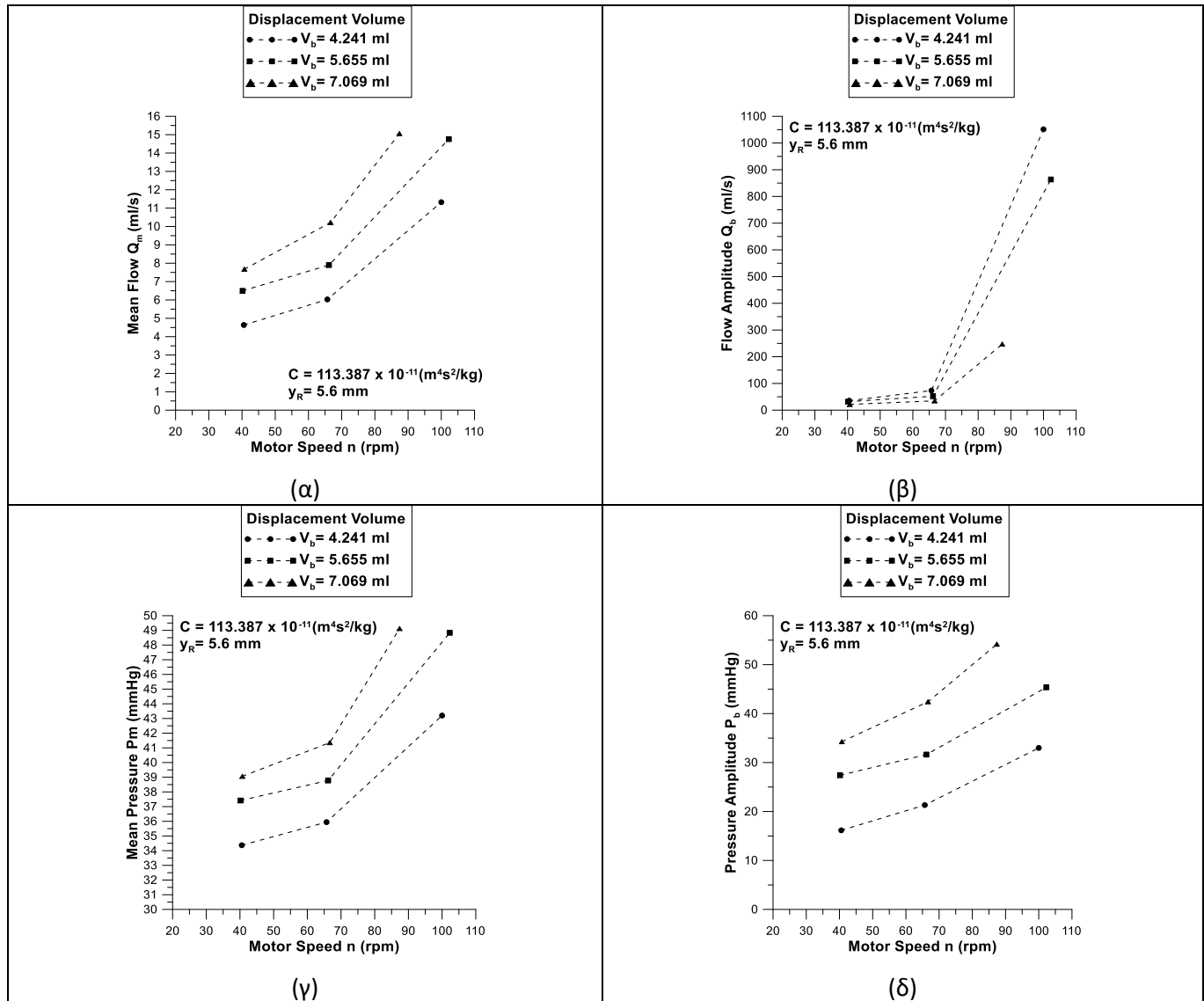
Σχήμα 6.2-12: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 7,069 \text{ ml}$.

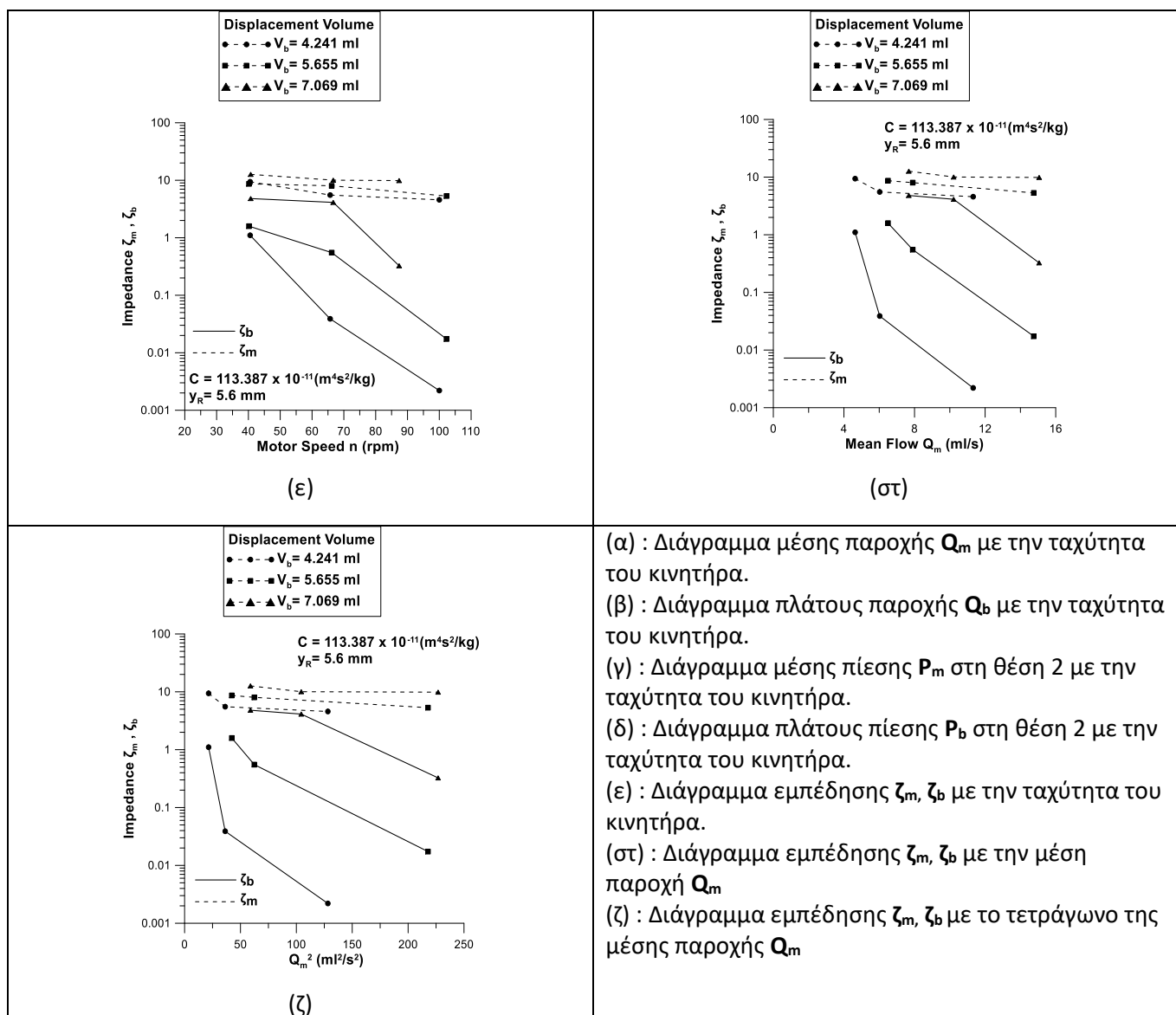
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (**Σχ. 6.2-12**) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R = 5,6 \text{ mm}$, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b = 7,069 \text{ ml}$. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι Z_m , Z_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η Z_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι πολύ

μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 10,58 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-13 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=5,6 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-13: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (}\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=5,6 \text{ mm}$.

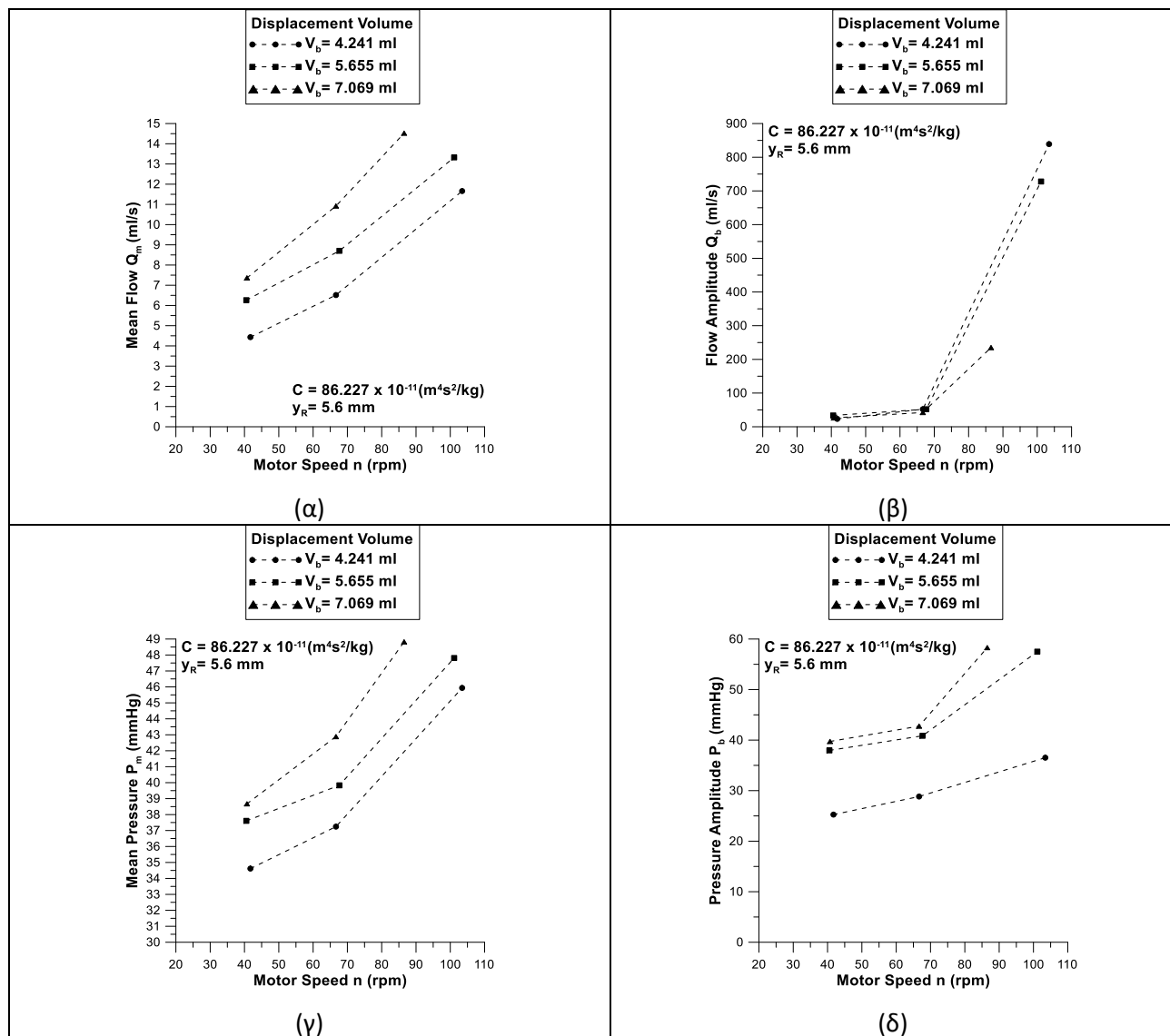
Σχόλια :

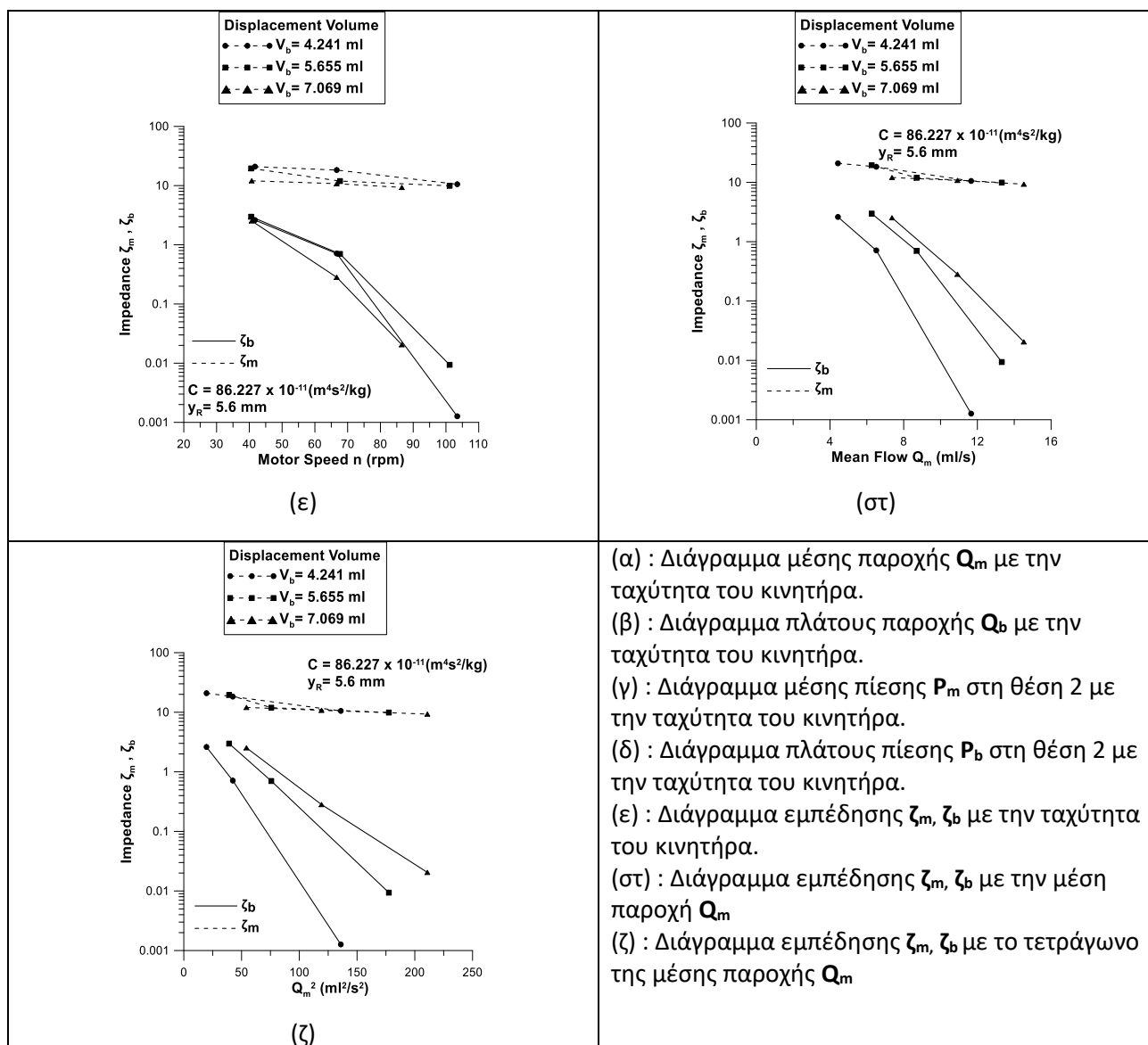
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-13) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=5,6 \text{ mm}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=113,387 \text{ (}\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg)}$, έχοντας όγκο αέρα $V_a=116,6316 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα με μεγαλύτερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R με αυξανόμενο ρυθμό αύξησης καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών

του κινητήρα n . Οι ζ_m , ζ_b μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάνας πύλης γ_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

6.2-14 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και διάκενο βάνας πύλης $\gamma_R=5,6 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-14: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$) και διάκενο βάνας πύλης $\gamma_R=5,6 \text{ mm}$.

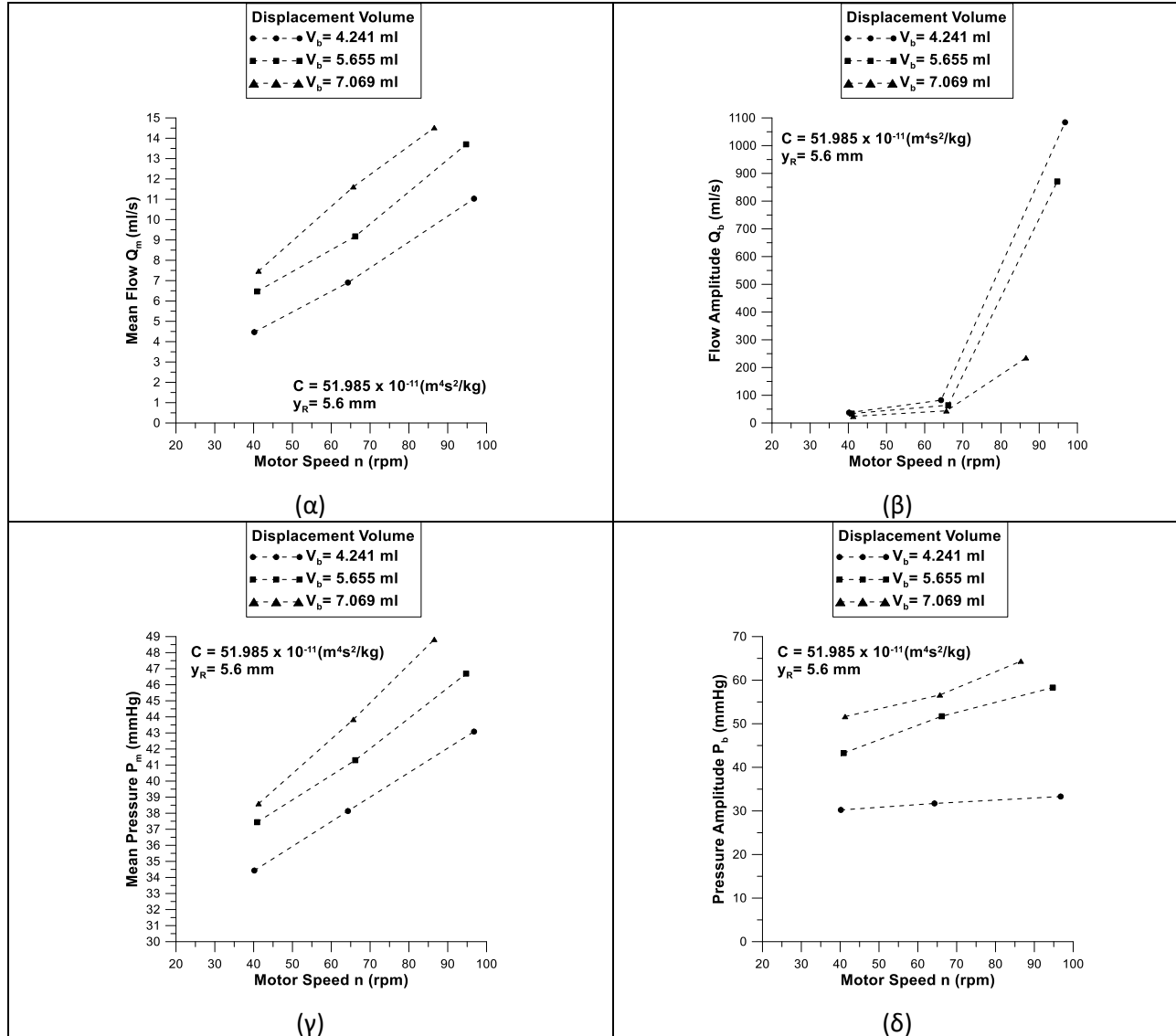
Σχόλια :

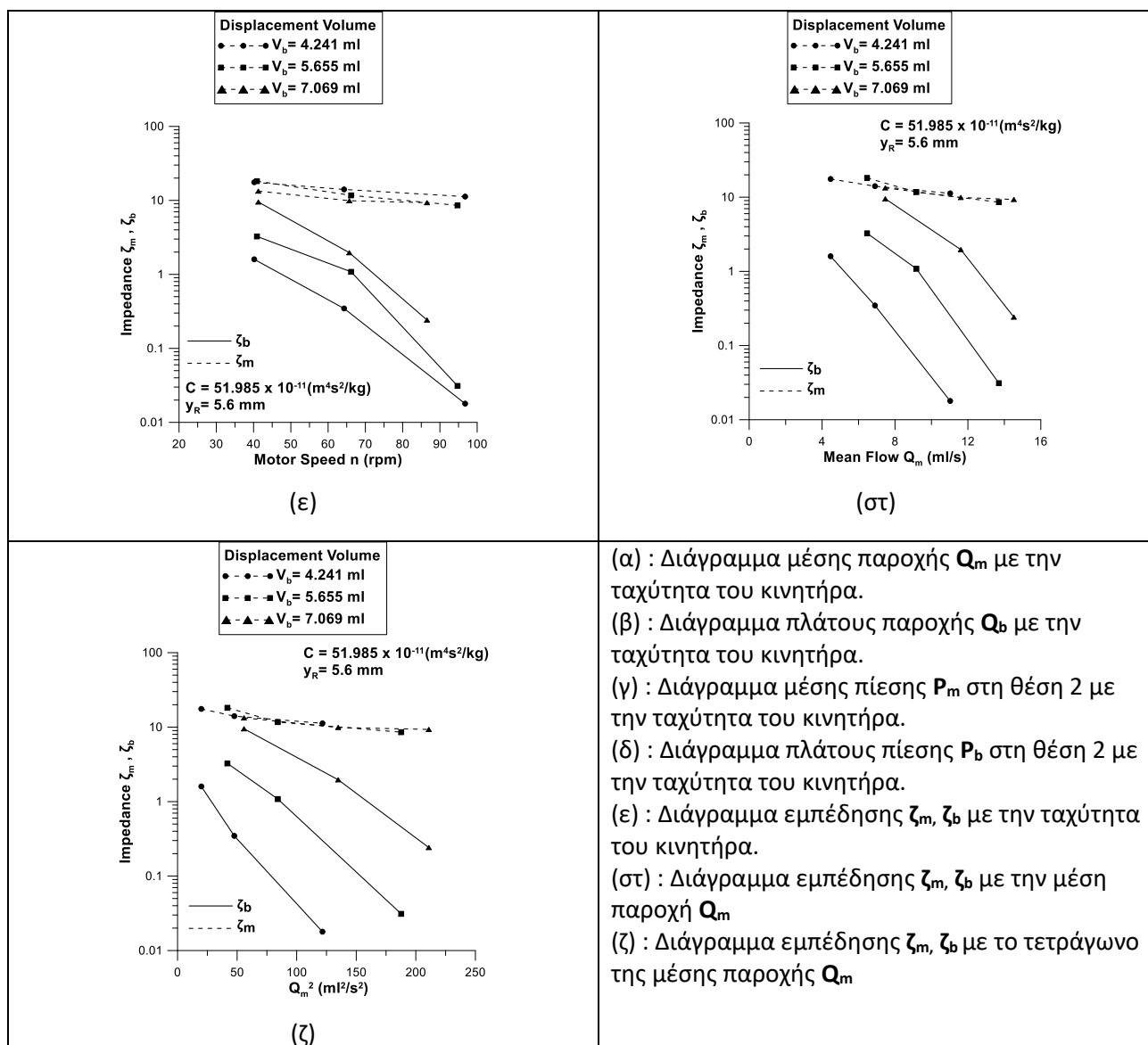
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-14) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $\gamma_R=5,6 \text{ mm}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=86,227$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$), έχοντας όγκο αέρα $V_a=88,3573 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα με μεγαλύτερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Η αύξηση αυτή στον ρυθμό δεν είναι τόσο έντονη όσο με $C=113,387$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$). Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η για κάθε γ_R με αυξανόμενο ρυθμό αύξησης καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Η αύξηση αυτή στον ρυθμό δεν είναι τόσο έντονη όσο με $C=113,387$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$). Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση

των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάνας πύλης γ_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

6.2-15 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \text{ (}\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg})$ και διάκενο βάνας πύλης $\gamma_R=5,6 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-15: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 (10^{-11} m^4 s^2 / kg)$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=5,6 \text{ mm}$.

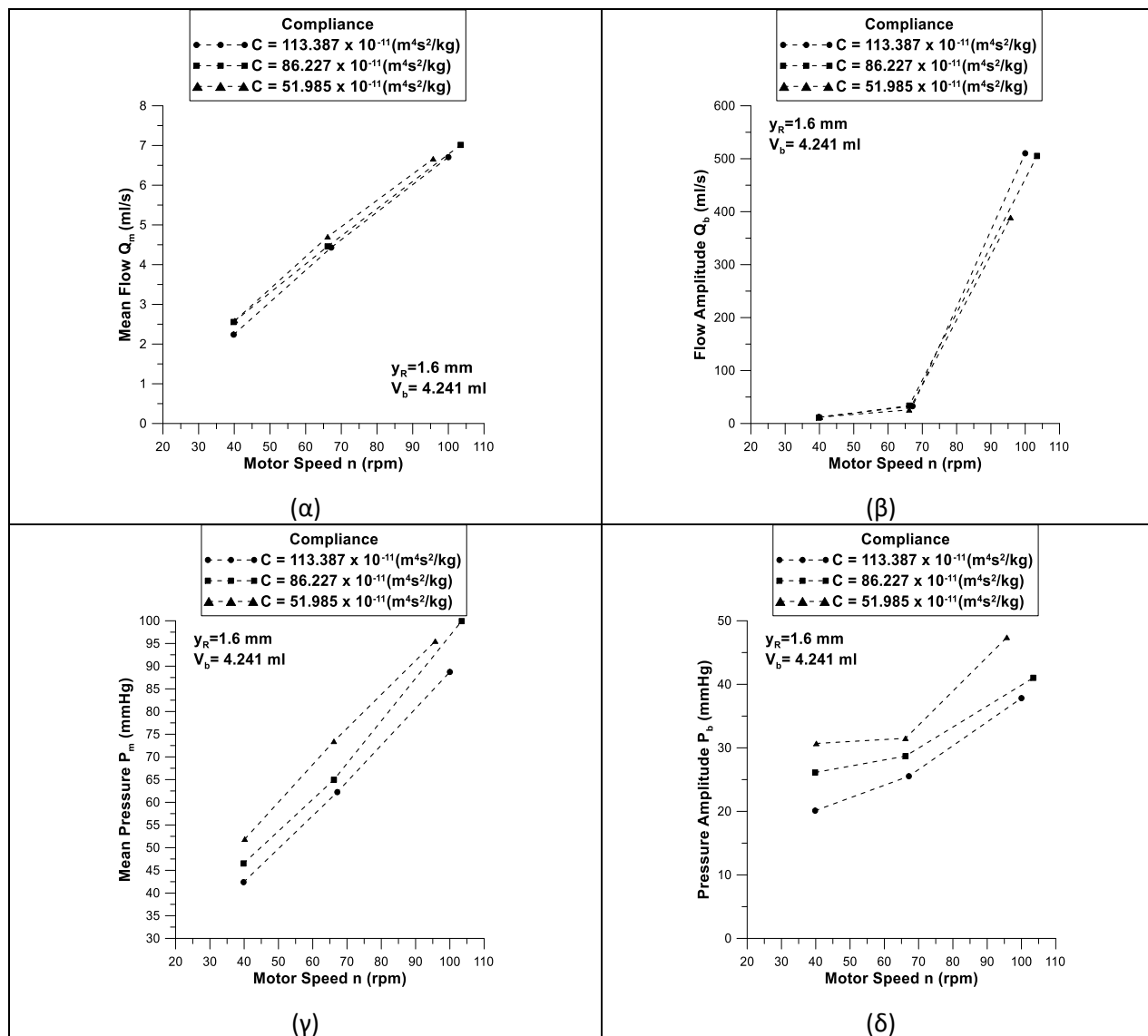
Σχόλια :

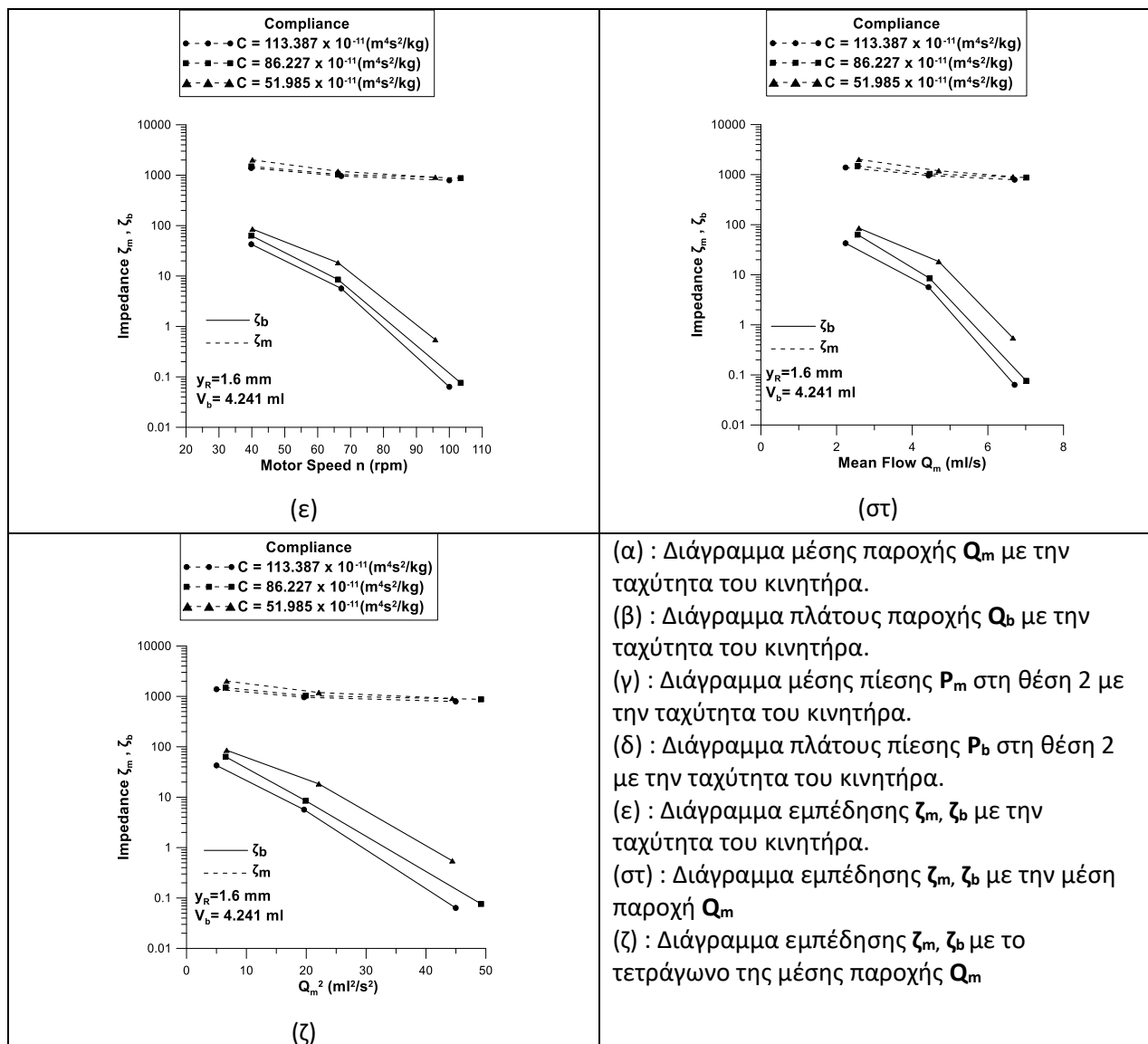
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-15) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=5,6 \text{ mm}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C= 51,985 (10^{-11} m^4 s^2 / kg)$, έχοντας όγκο αέρα $V_a= 53,0144 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι

δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάνας πύλης y_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

6.2-16 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 4,241 \text{ ml}$.





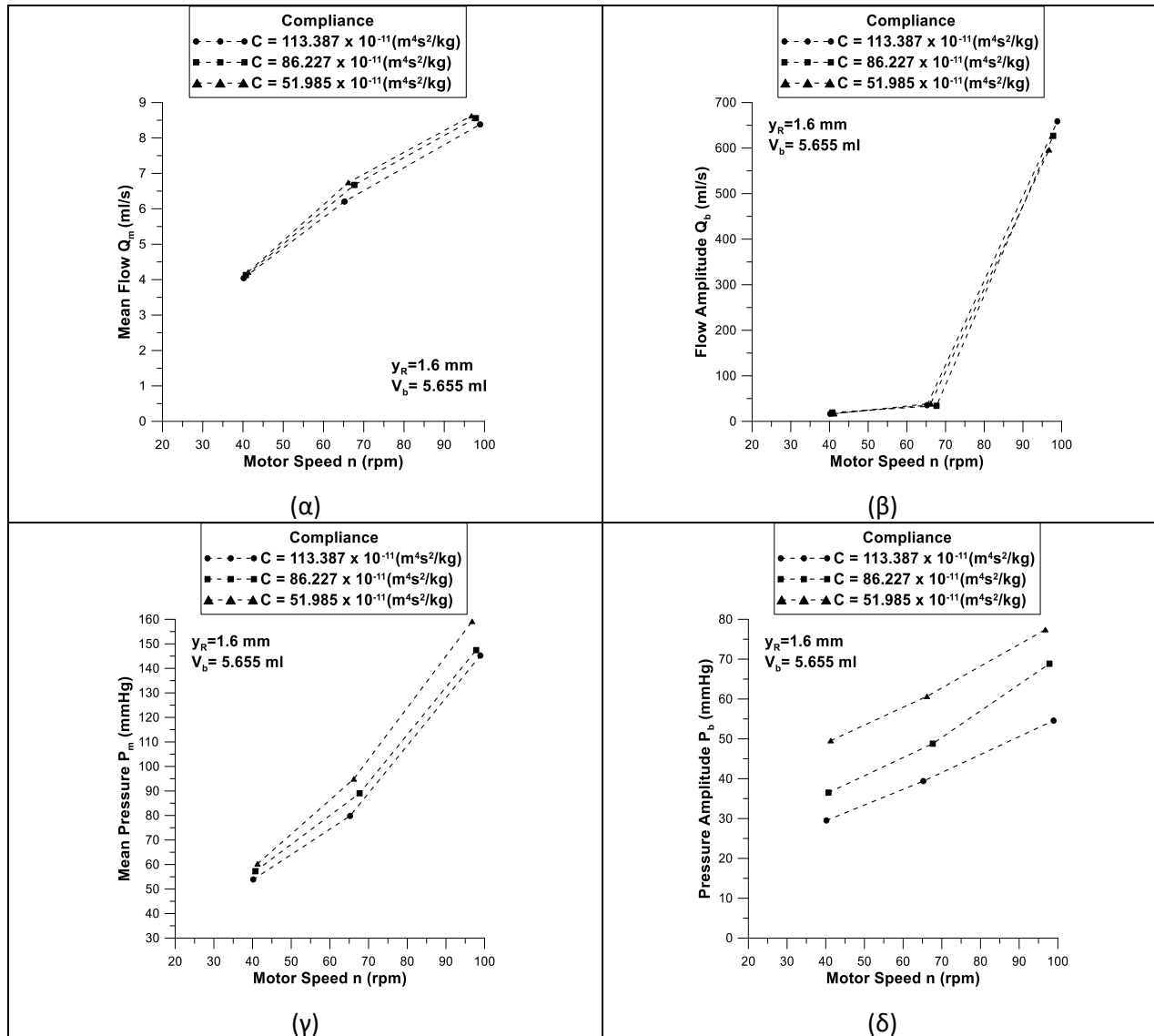
Σχήμα 6.2-16: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R=1,6$ mm και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.

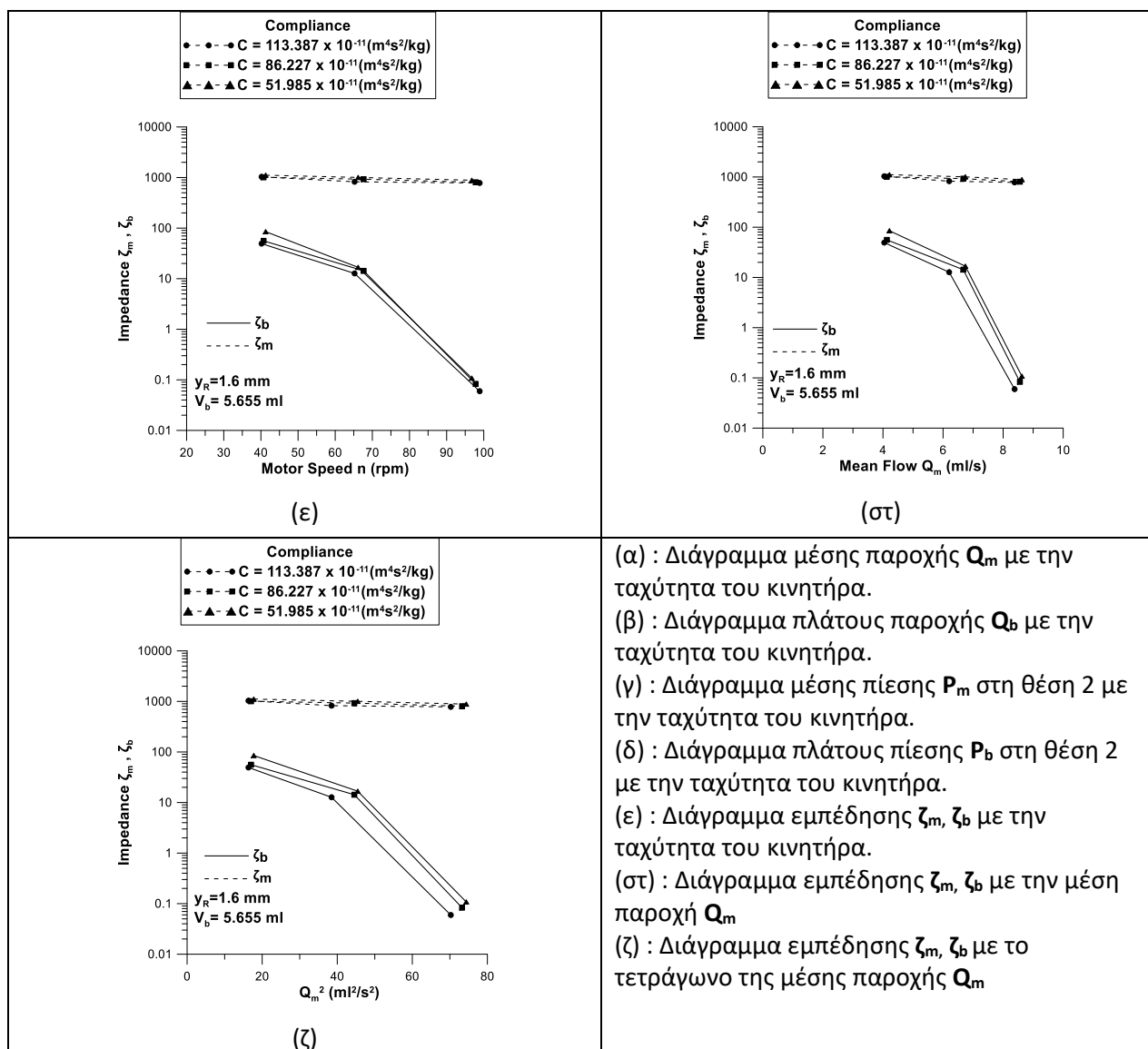
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-16) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b=4,241$ ml. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι πολύ

μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 1097,51 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-17 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 5,655 \text{ ml}$.





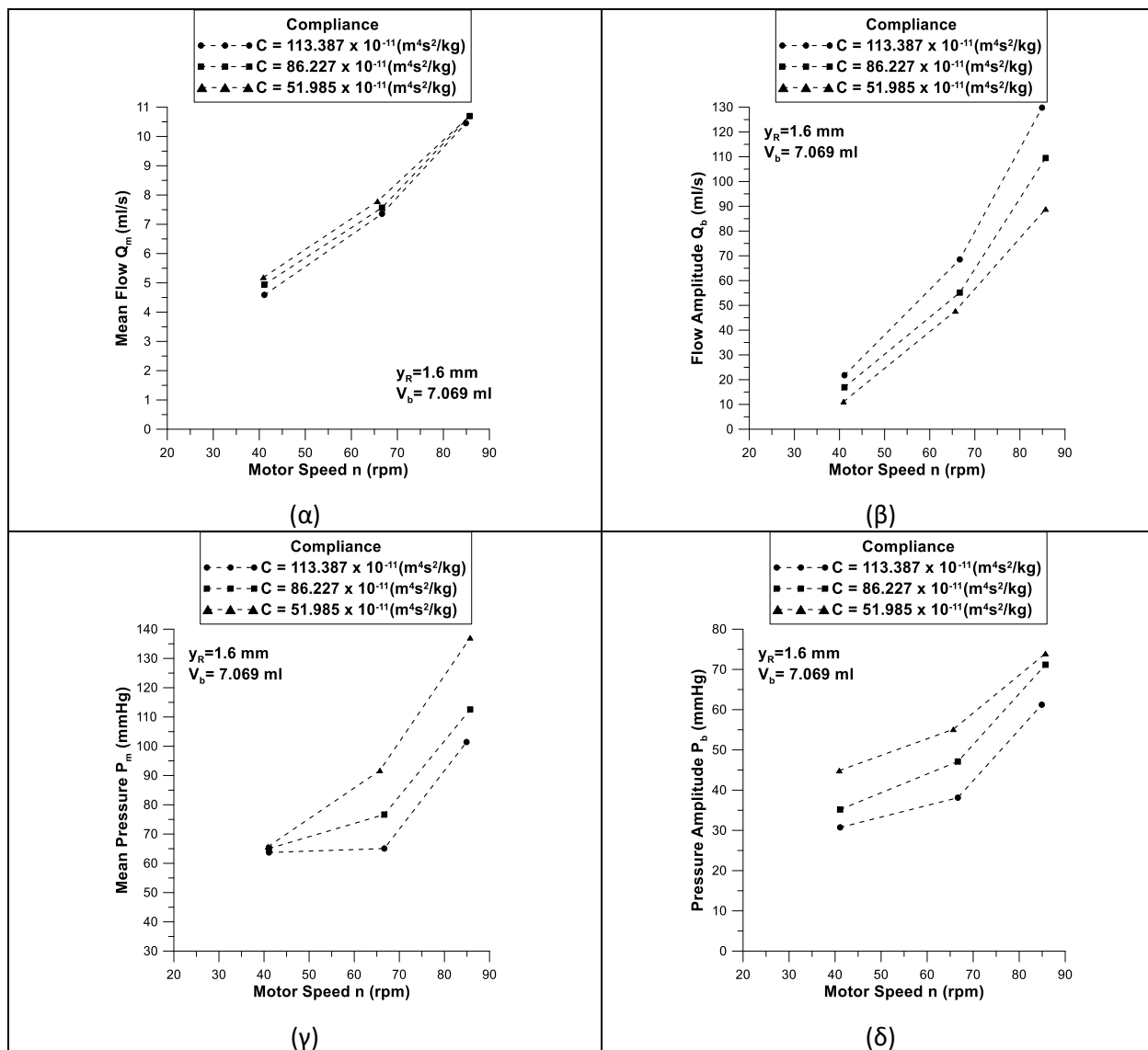
Σχήμα 6.2-17: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 5,655 \text{ ml}$.

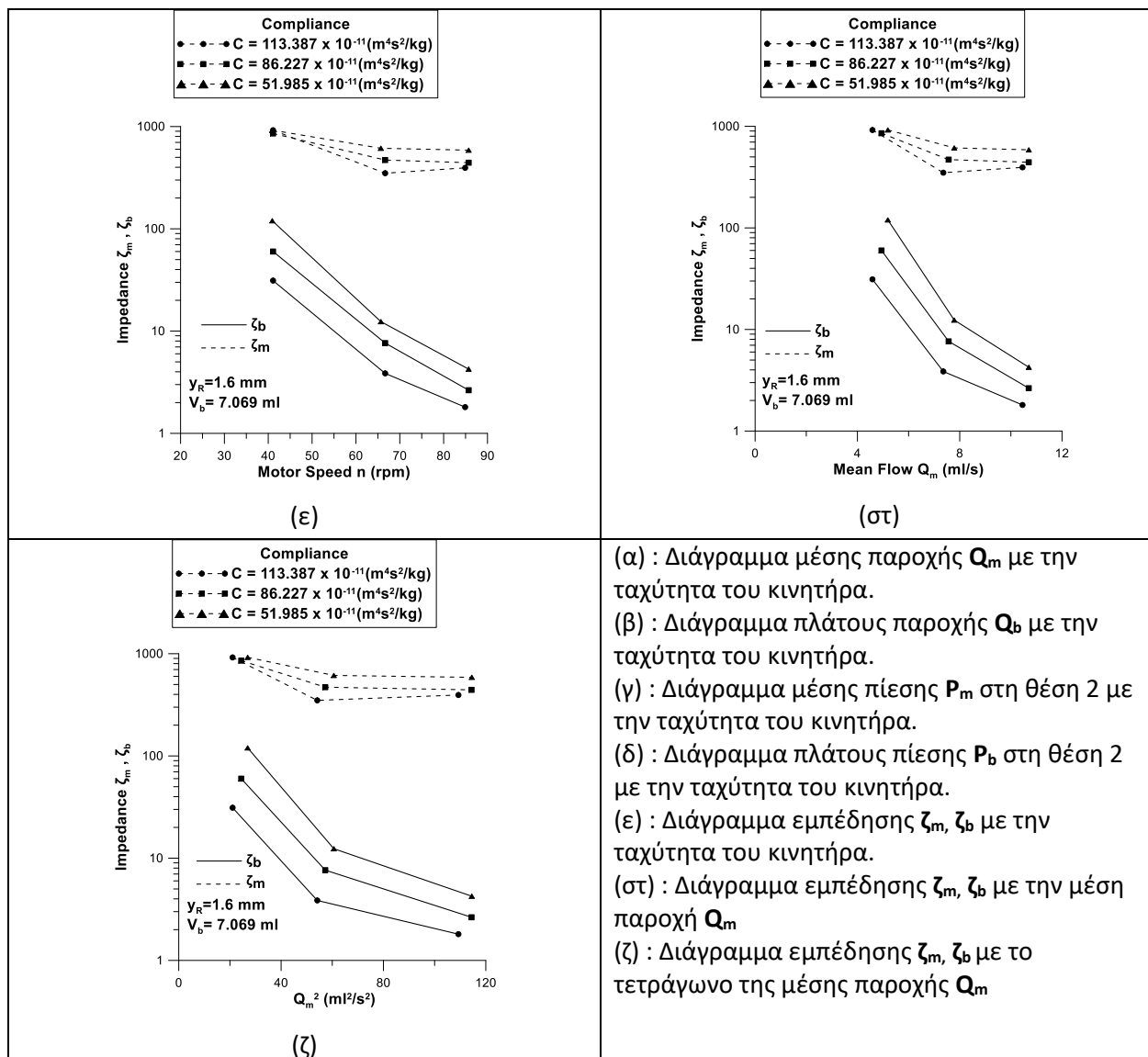
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-17) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b = 5,655 \text{ ml}$. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι πολύ

μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 1226,15 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-18 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6$ mm και όγκο εμβολισμού $V_b = 7,069$ ml.





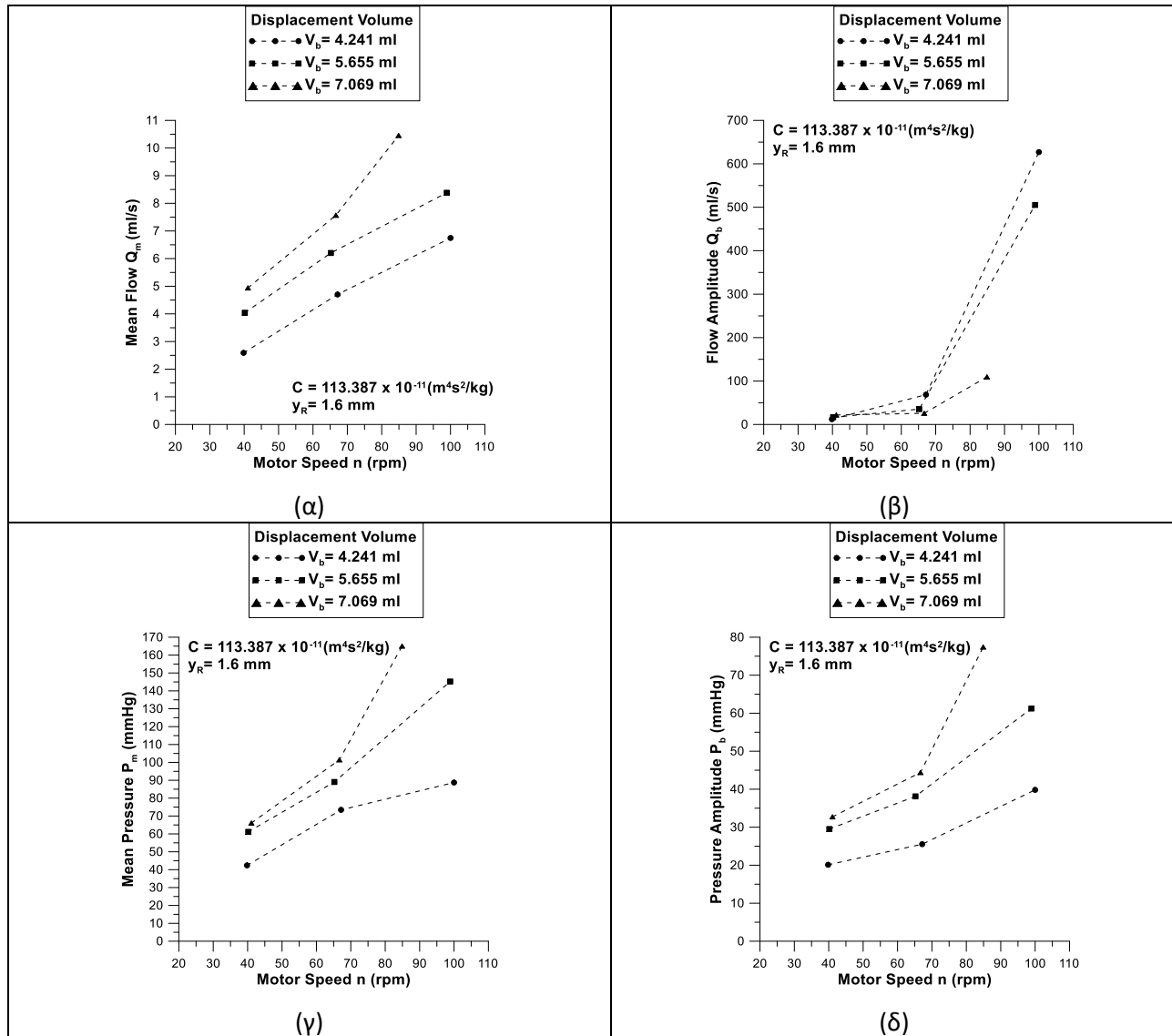
Σχήμα 6.2-18: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 7,069 \text{ ml}$.

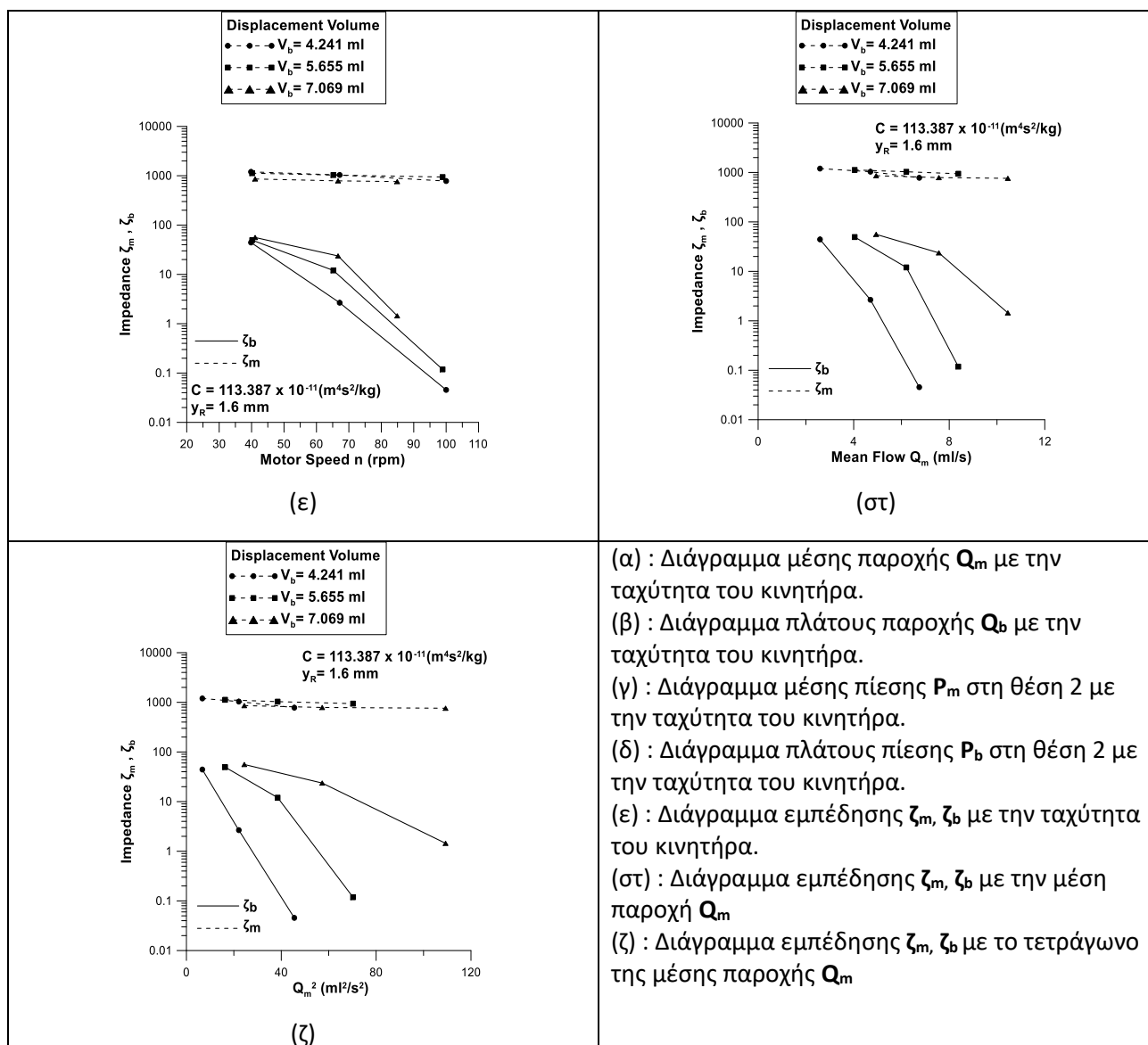
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-18) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R = 1,6 \text{ mm}$, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b = 7,069 \text{ ml}$. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι πολύ

μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 333,92 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-19 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=1,6 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-19: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \text{ (}\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=1,6 \text{ mm}$.

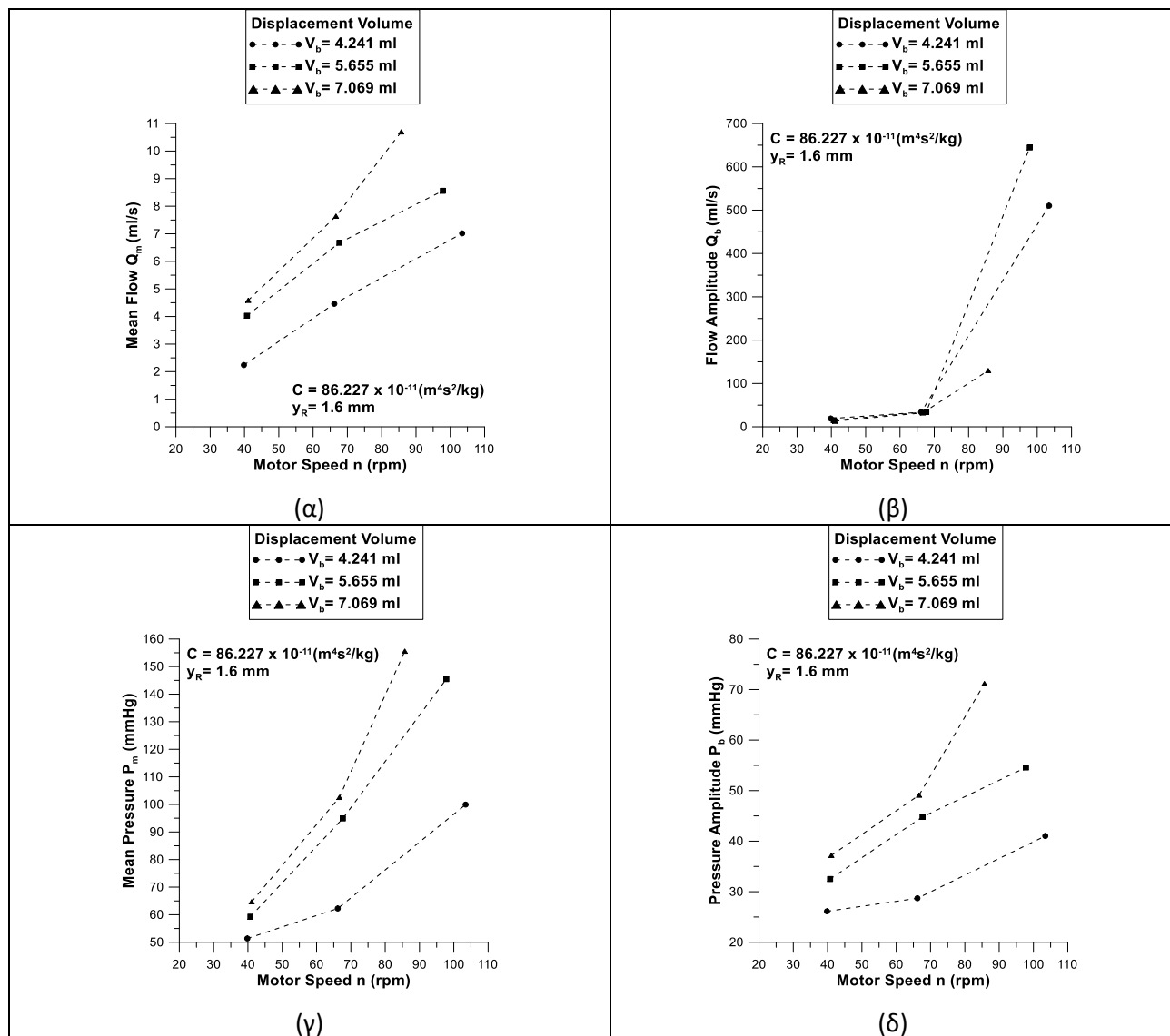
Σχόλια :

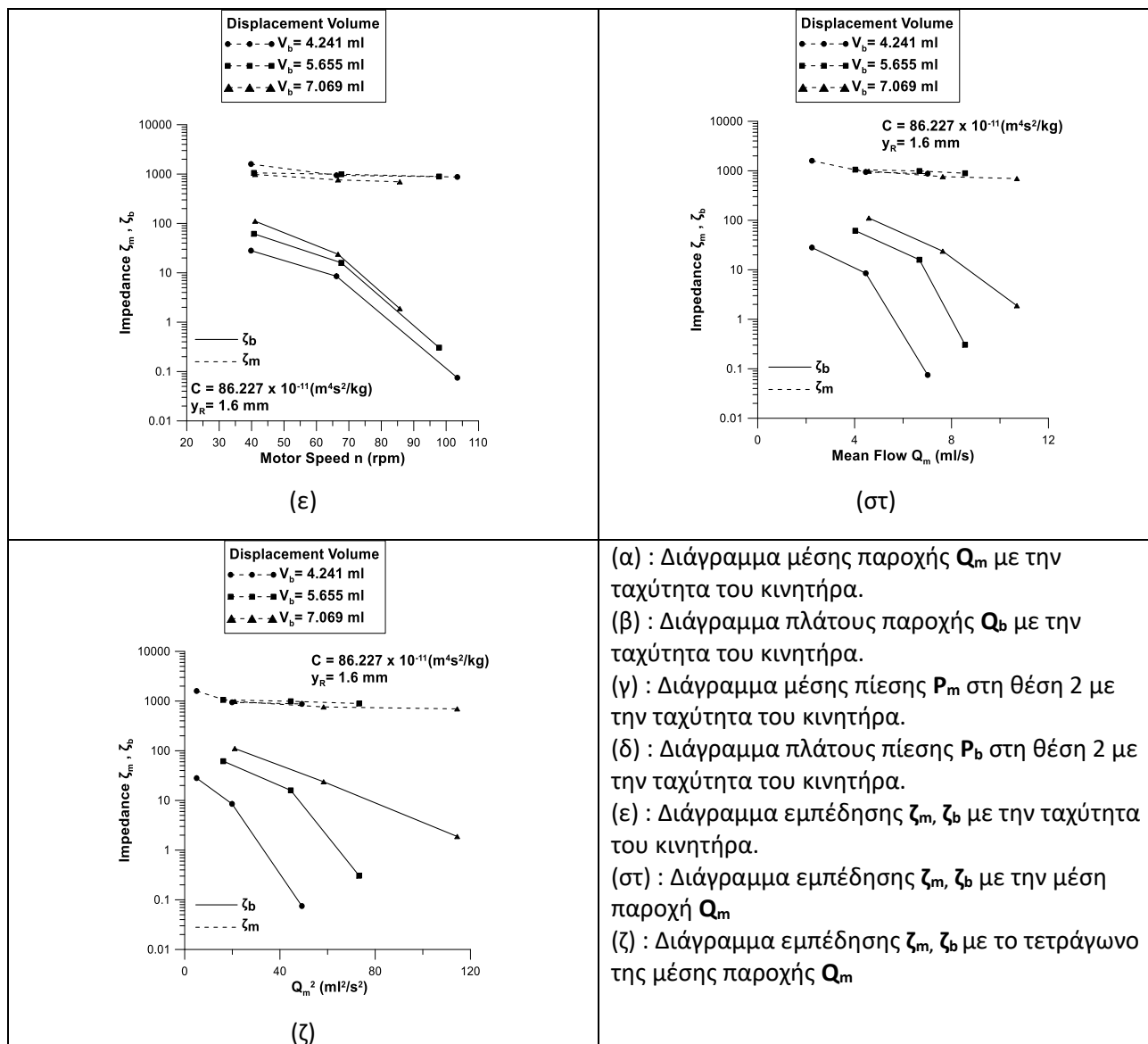
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-19) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=1,6 \text{ mm}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=113,387 \text{ (}\times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg)}$, έχοντας όγκο αέρα $V_a=116,6316 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Ο ρυθμός αύξησης παρατηρείται ότι αυξάνεται για όγκο εμβολισμού $V_b=7,069 \text{ ml}$, ενώ μειώνεται για $V_b=4,241 \text{ ml}$. Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b

μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάνας πύλης γ_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

6.2-20 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και διάκενο βάνας πύλης $\gamma_R=1,6 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-20: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{ s}^2 \text{ / kg)}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=1,6 \text{ mm}$.

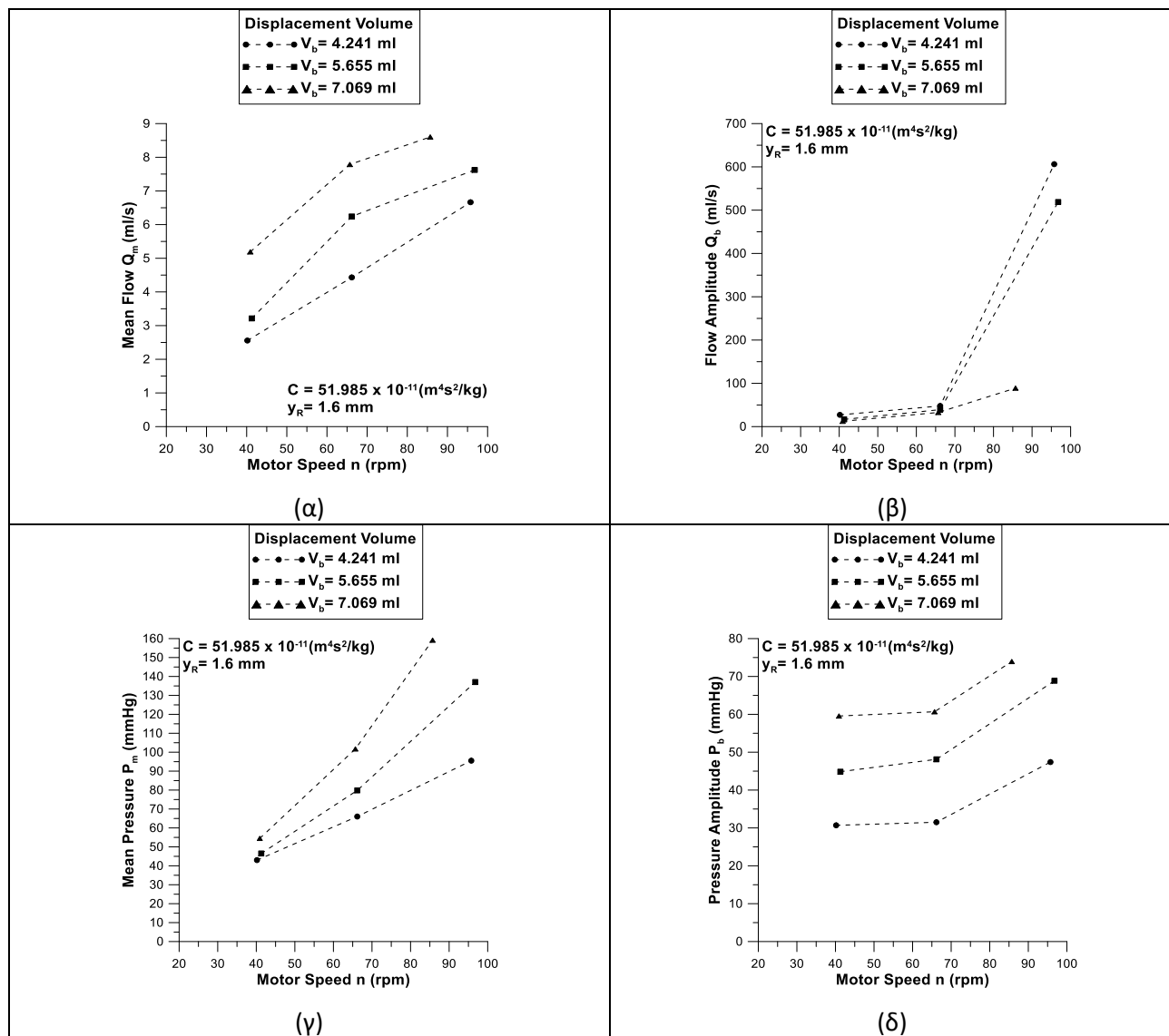
Σχόλια :

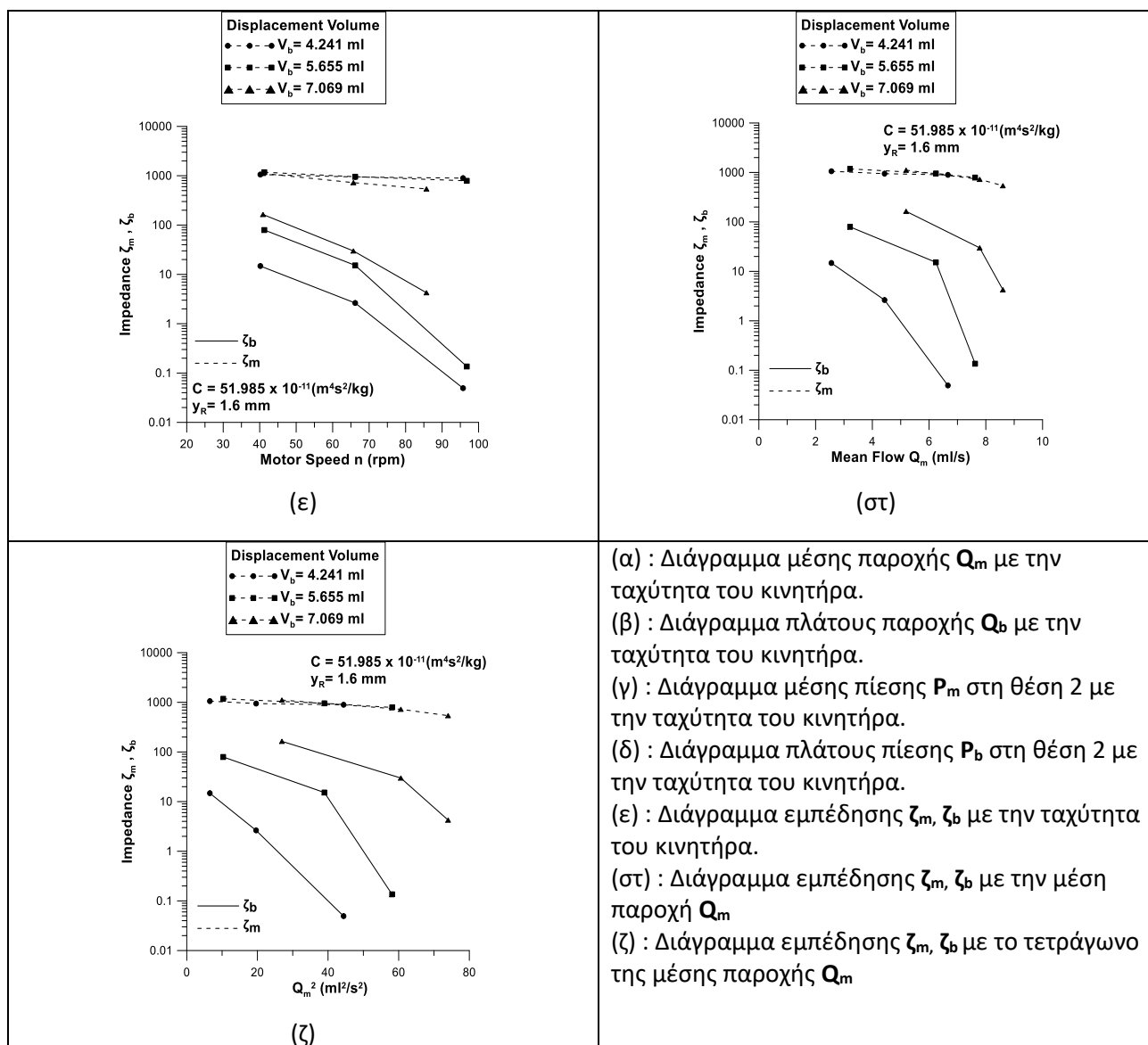
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-20) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=1,6 \text{ mm}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=86,227 \text{ (} \times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{ s}^2 \text{ / kg)}$, έχοντας όγκο αέρα $V_a=88,3573 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m , ζ_b μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι

δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάνας πύλης γ_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

6.2-21 : Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και διάκενο βάνας πύλης $\gamma_R=1,6 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-21: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$) και διάκενο βάνας πύλης $y_R=1,6$ mm.

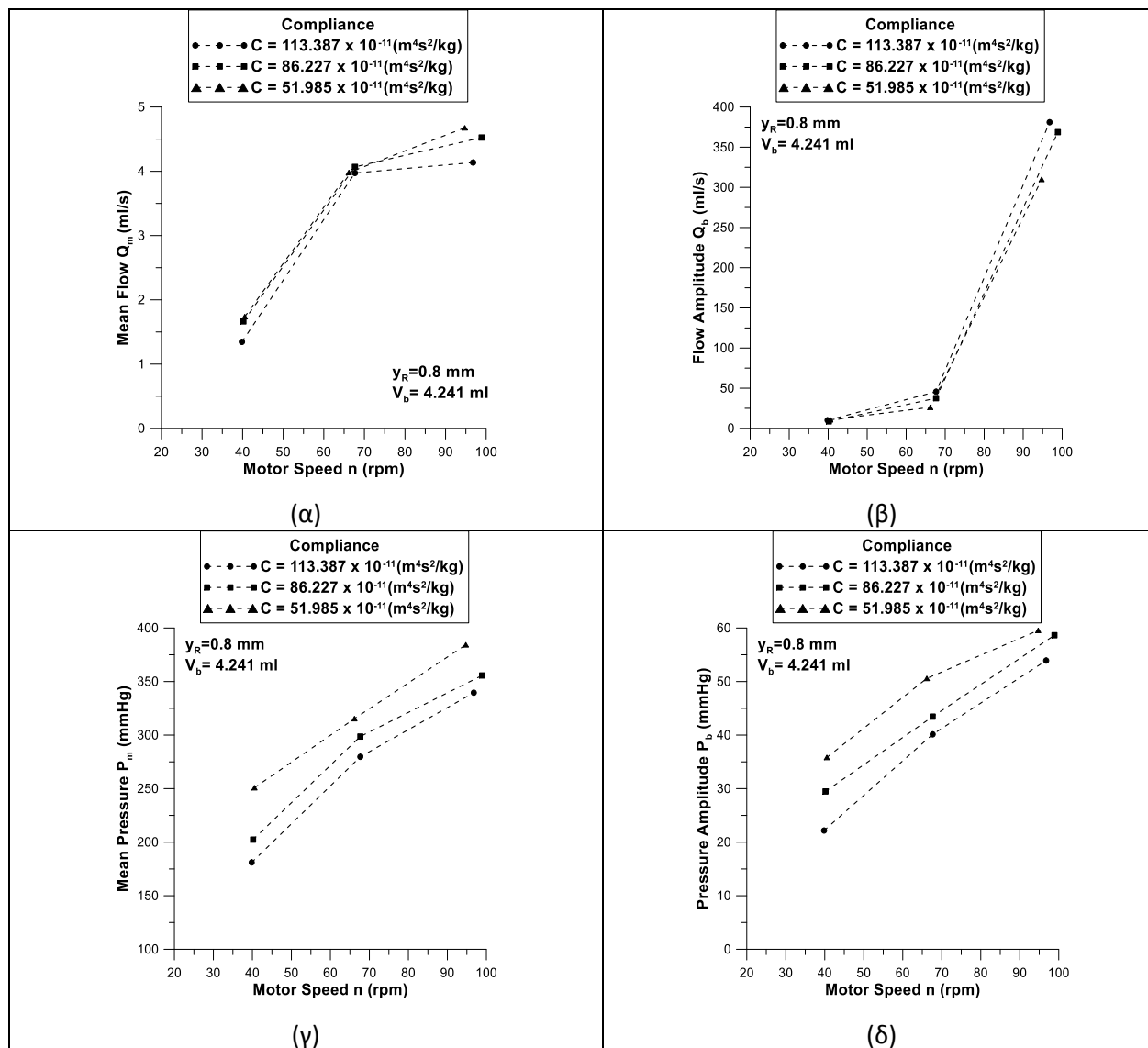
Σχόλια :

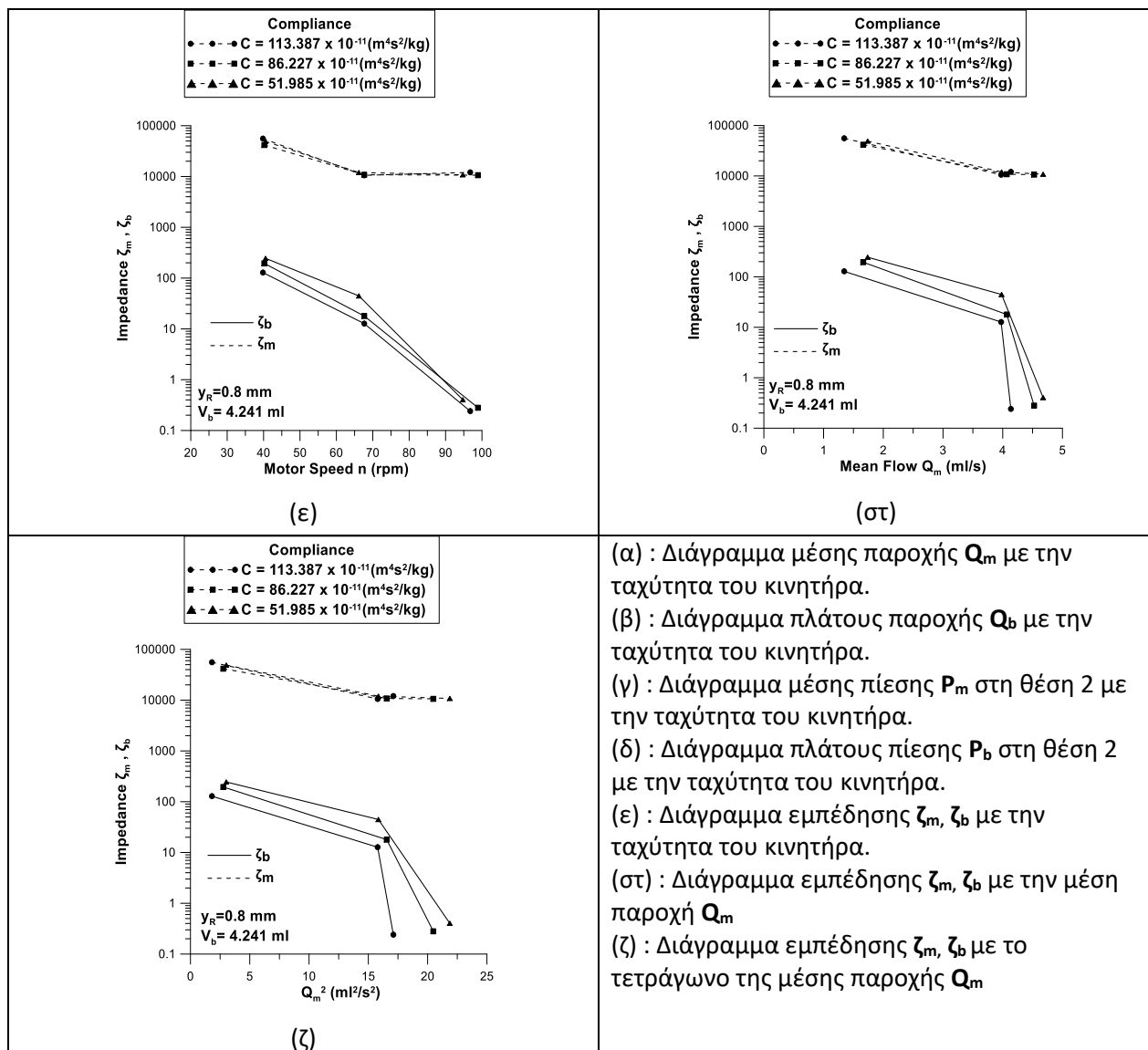
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-21) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=1,6$ mm, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C= 51,985$ ($\times 10^{-11} \text{ m}^4 \text{s}^2/\text{kg}$), έχοντας όγκο αέρα $V_a= 53,0144$ ml στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι Z_m, Z_b μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι

δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάνας πύλης y_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

6.2-22 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 4,241 \text{ ml}$.





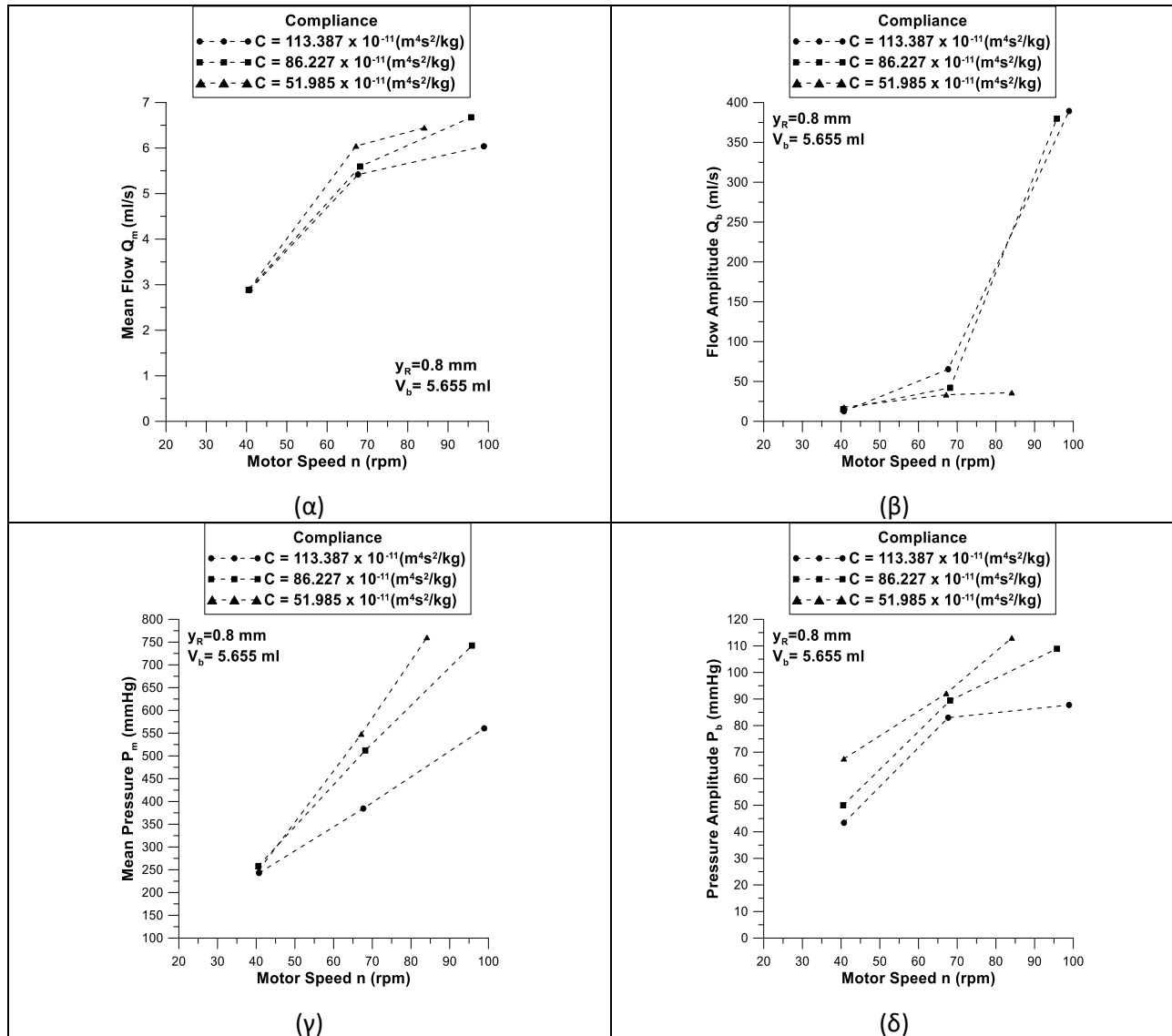
Σχήμα 6.2-22: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.

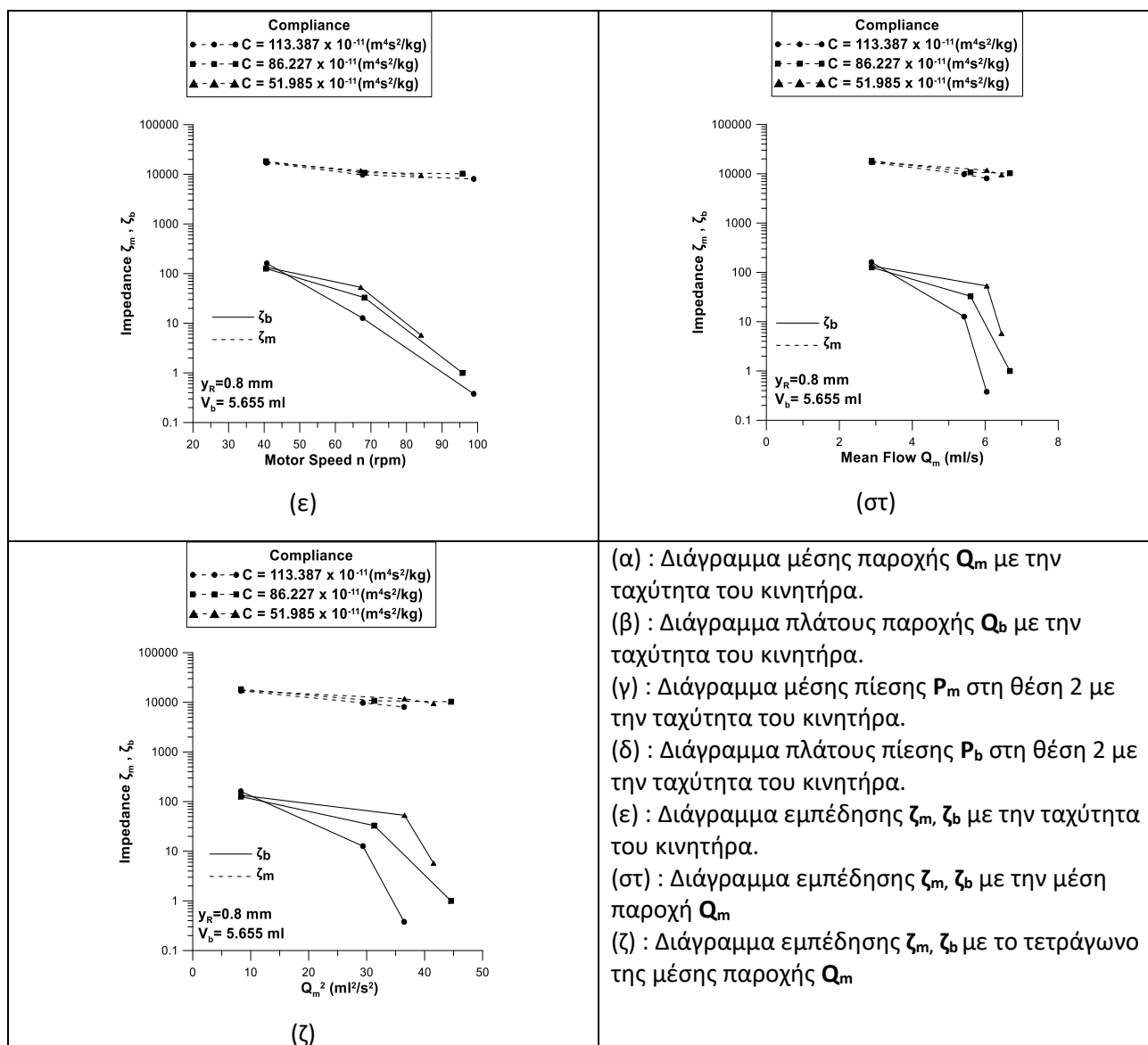
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-22) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b=4,241$ ml. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι πολύ

μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 1227,06 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-23 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 5,655 \text{ ml}$.





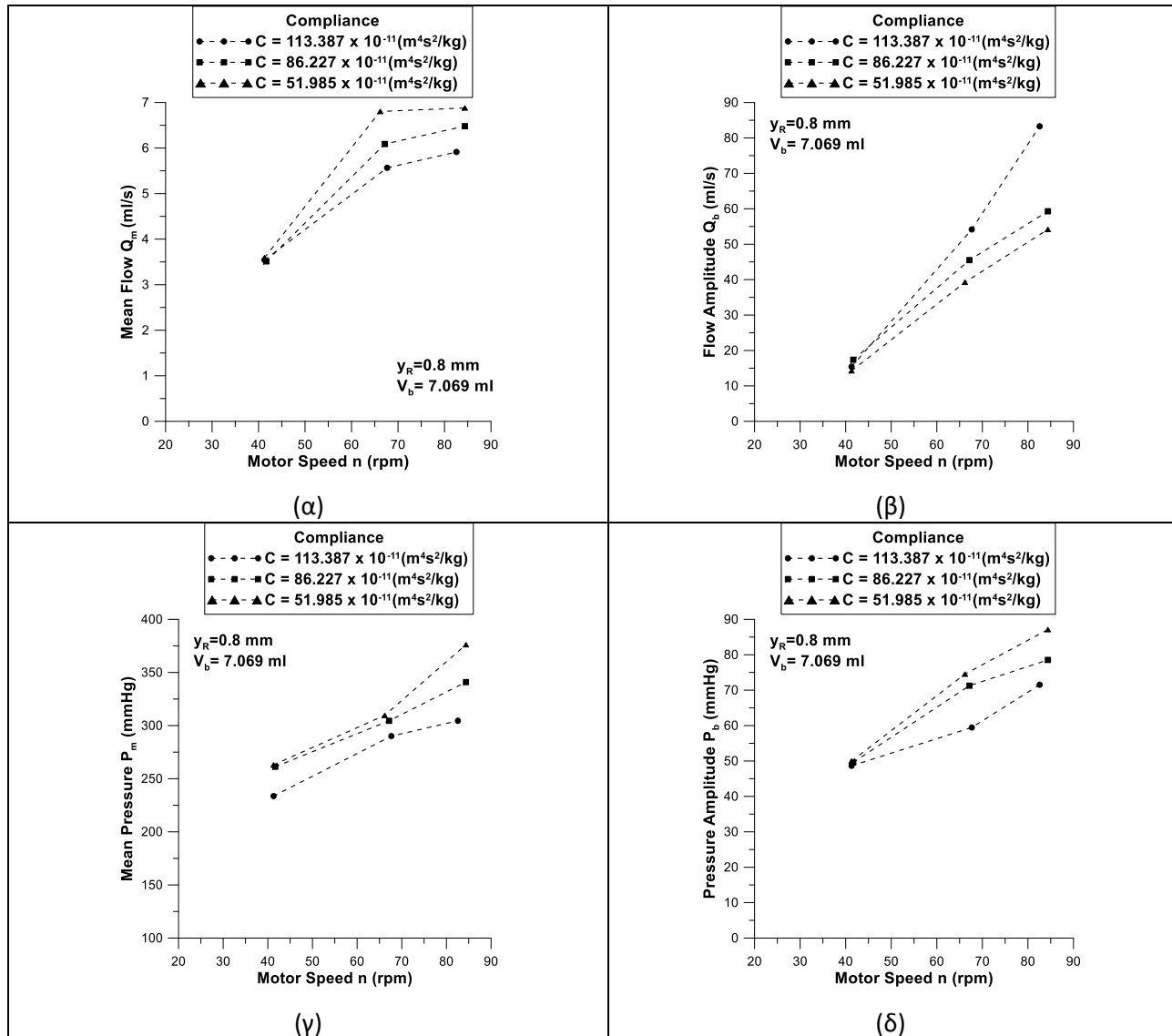
Σχήμα 6.2-23: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655$ ml.

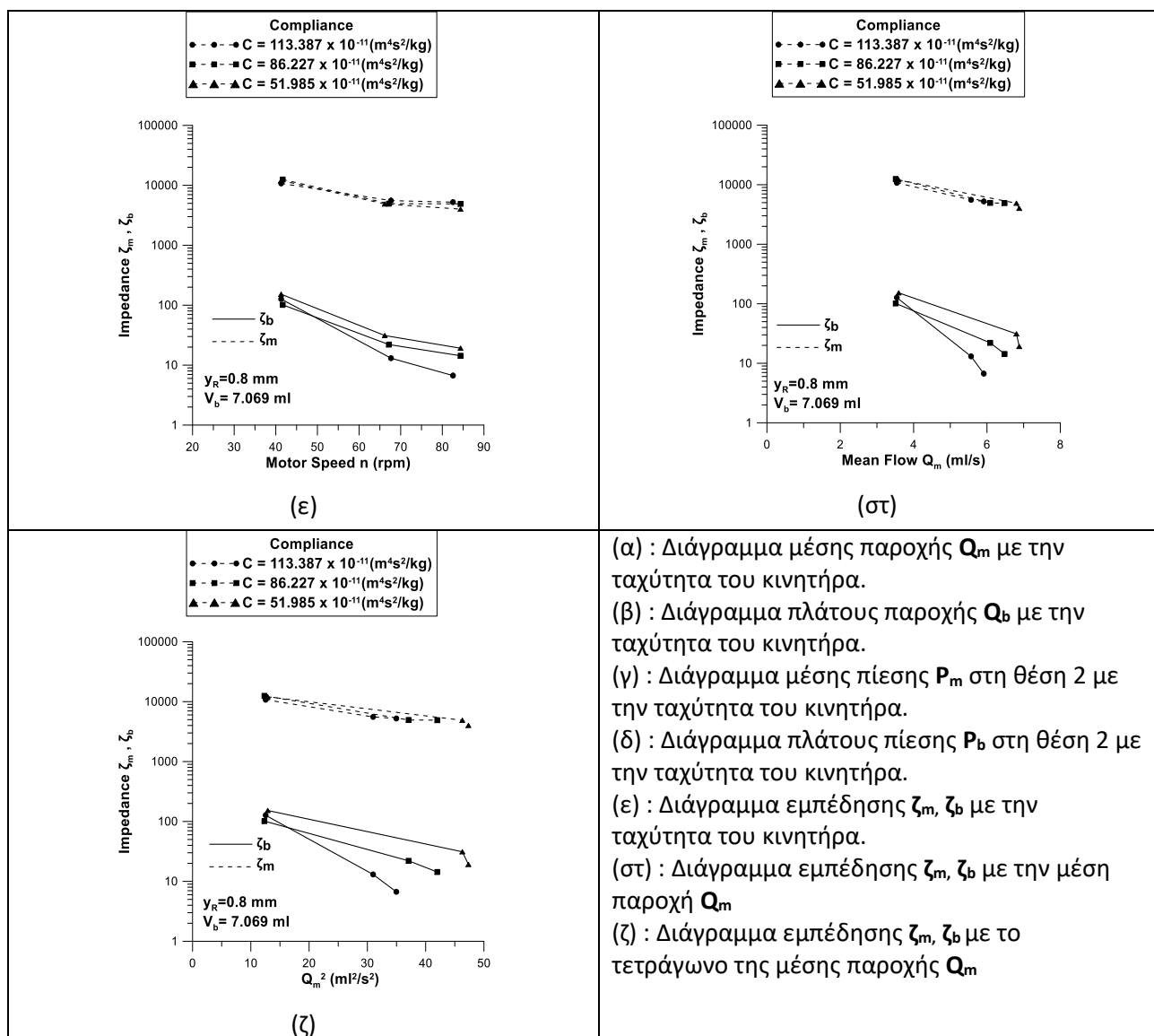
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-23) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b= 5,655$ ml. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι πολύ

μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 1431,63 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-24 : Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R = 0,8 \text{ mm}$ και όγκο εμβολισμού $V_b = 7,069 \text{ ml}$.





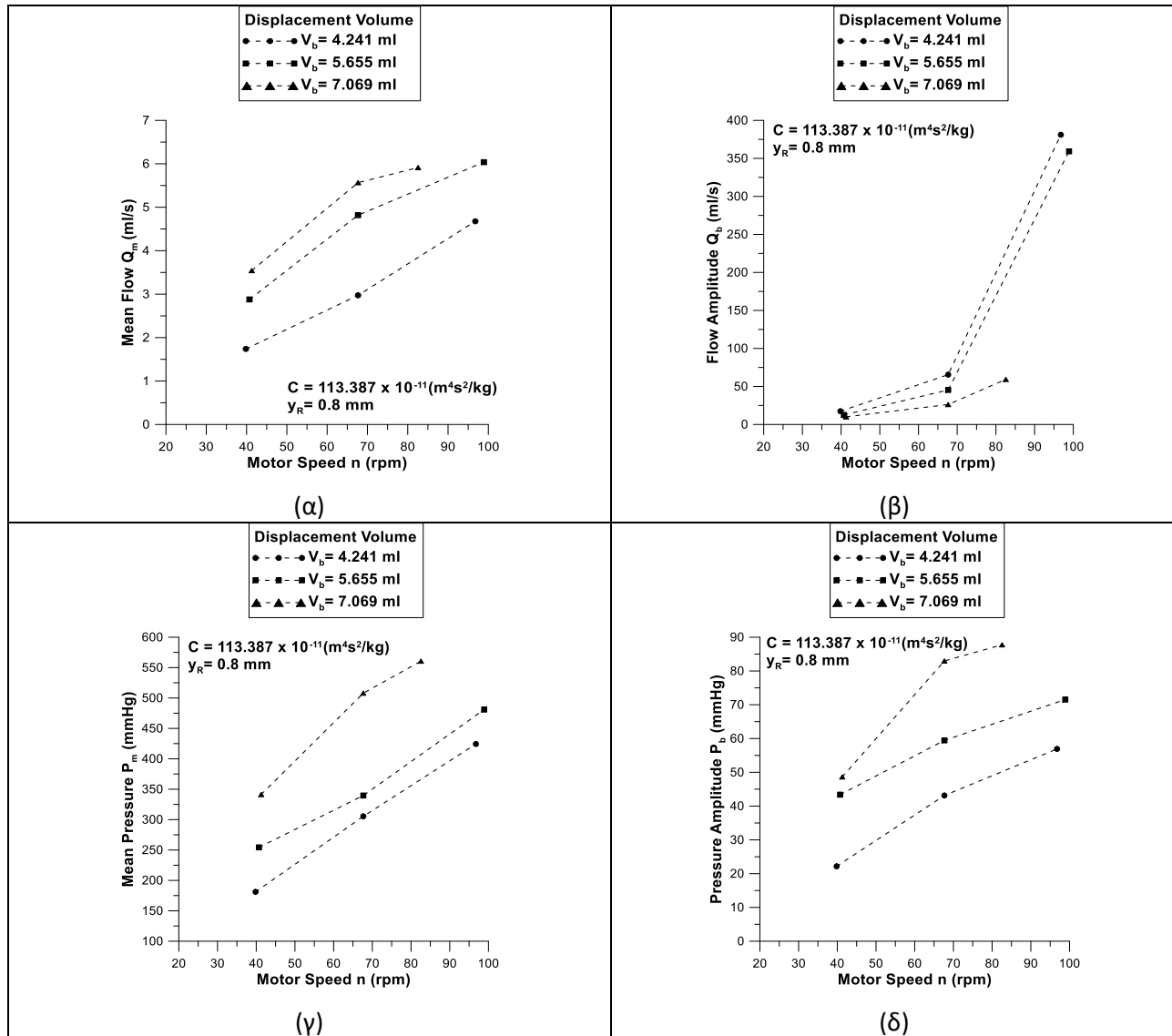
Σχήμα 6.2-24: Διαγράμματα μεγεθών για διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069$ ml.

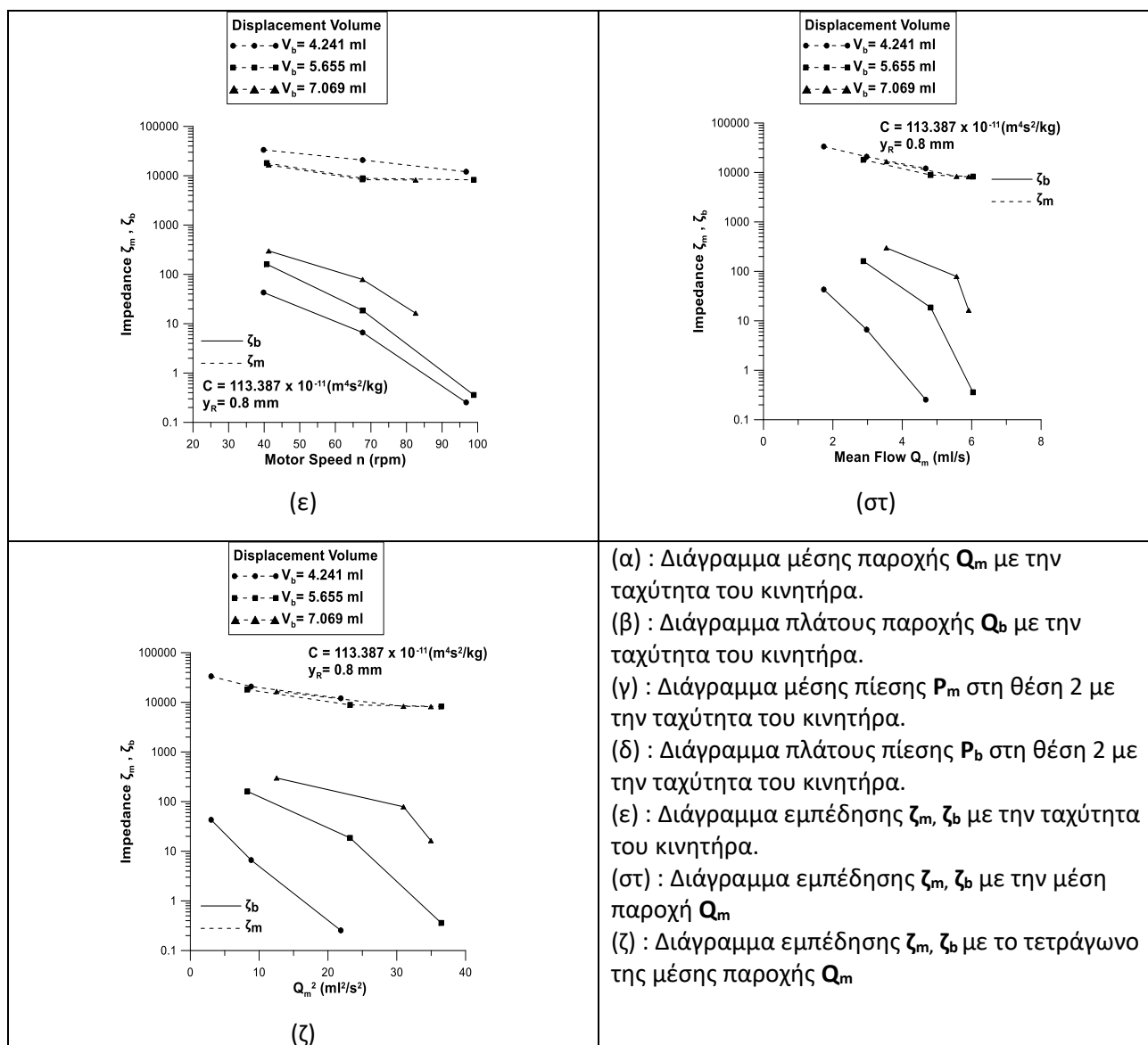
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-24) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm, όπως και ο όγκος εμβολισμού $V_b=7,069$ ml. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ενδοτικότητας C , μεταβάλλοντας τον όγκο αέρα V_a στο δοχείο Windkessel. Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα. Το πλάτος παροχής Q_b αυξάνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 μειώνεται με την αύξηση της ενδοτικότητας C για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b . Καθώς το διάκενο y_R της βάνας πύλης παραμένει σταθερό, η ενδοτικότητα C είναι ο μόνος παράγοντας που επηρεάζει την αντίσταση στη ροή. Παρατηρείται όμως ότι η επίδραση της είναι πολύ

μικρότερη από αυτήν της βάνας πύλης, με την μέγιστη διαφορά στην εμπέδηση να είναι 1229,19 για τις δύο ακραίες τιμές ενδοτικότητας C .

6.2-25: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-25: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=113,387 (\times 10^{-11} m^4 s^2 / kg)$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8 \text{ mm}$.

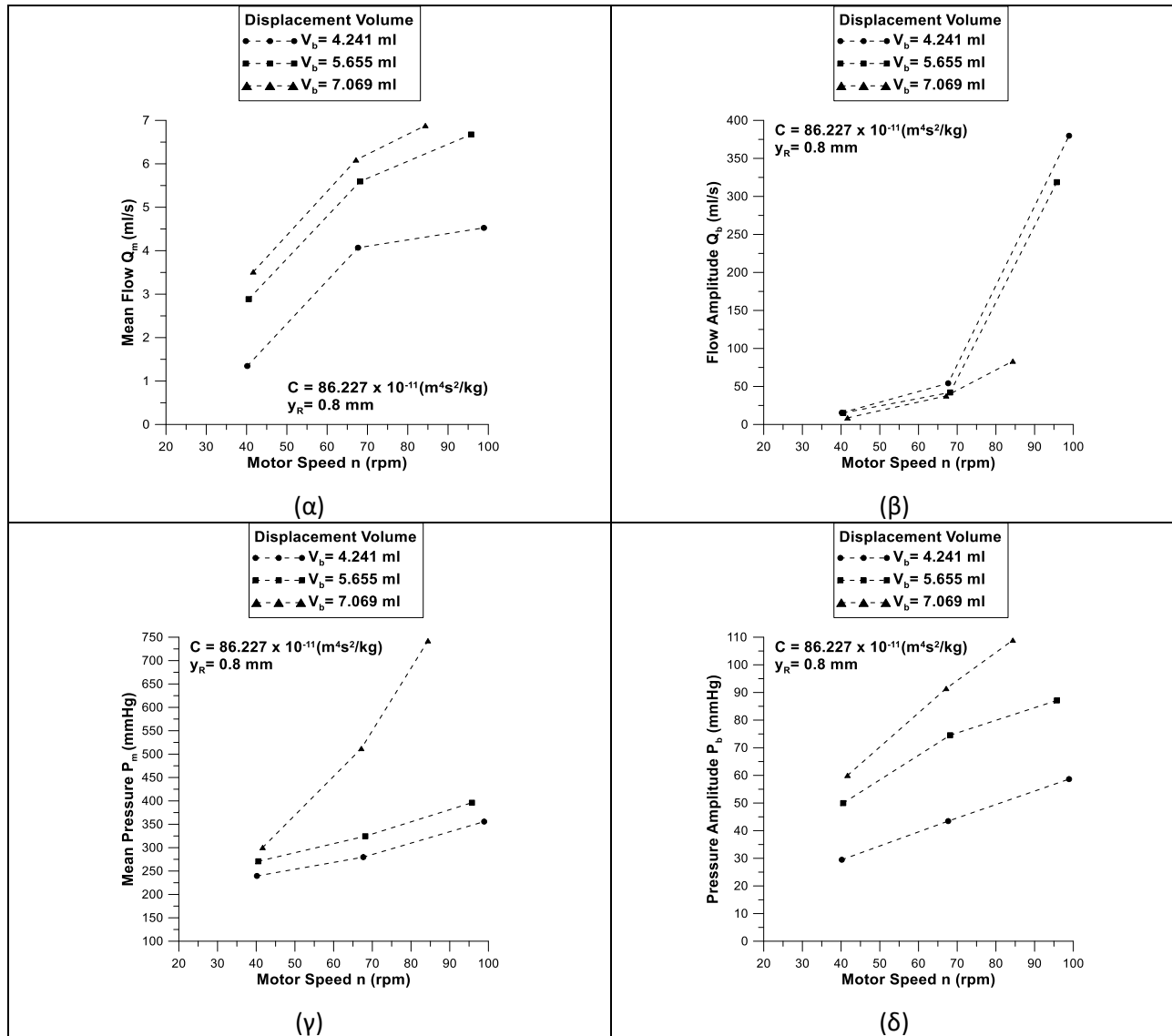
Σχόλια :

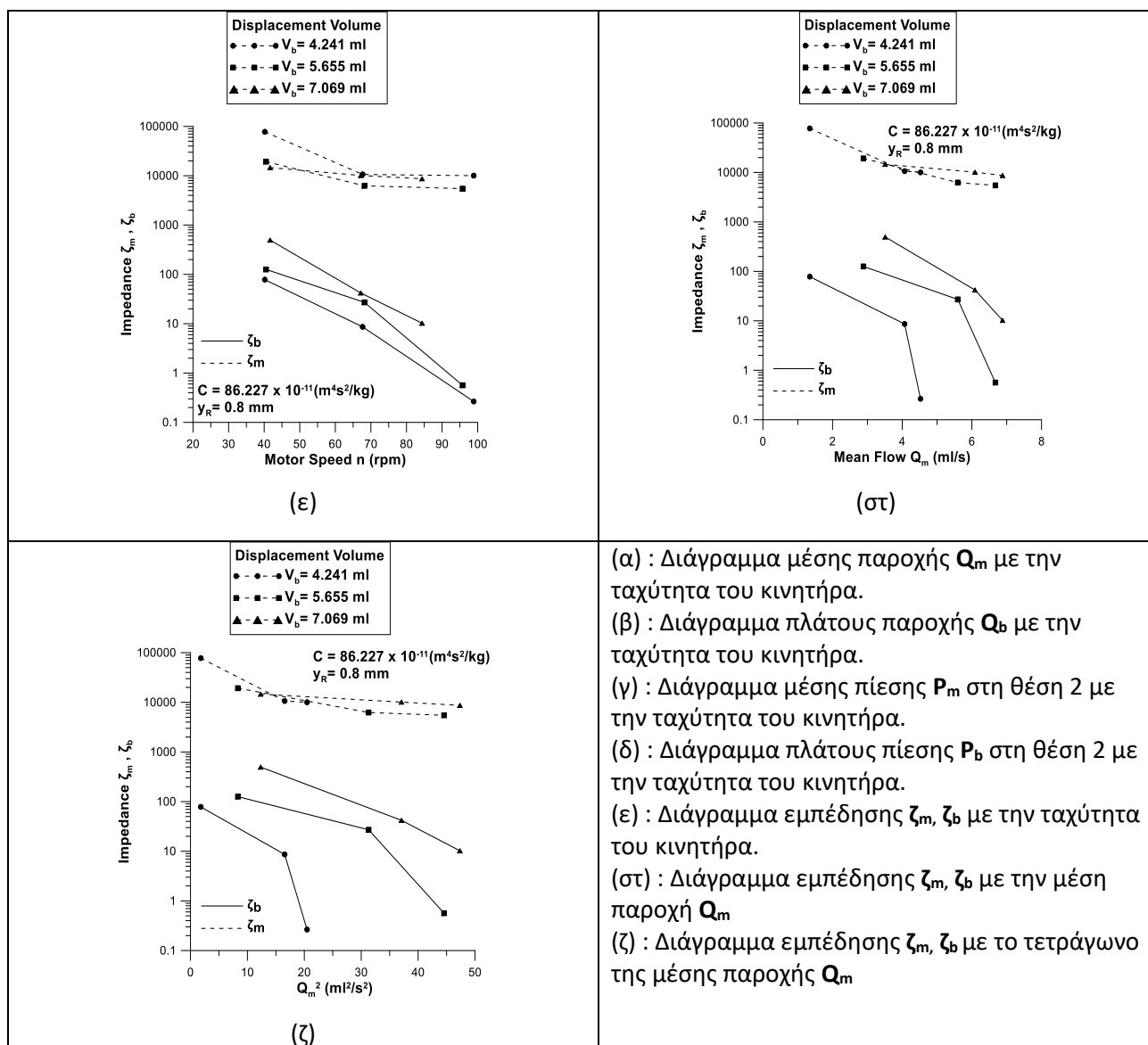
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-25) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=0,8 \text{ mm}$, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=113,387 (\times 10^{-11} m^4 s^2 / kg)$, έχοντας όγκο αέρα $V_a=116,6316 \text{ ml}$ στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b , ιδιαίτερα για $V_b=7,069 \text{ ml}$, για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m , ζ_b

σε αντίθεση με τις άλλες μετρήσεις με σταθερά C και y_R παρουσιάζουν μεταβολή και αυξάνονται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b και της ταχύτητας κινητήρα n /μέσης παροχής Q_m .

6.2-26: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-26: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=86,227$ ($\times 10^{-11} m^4 s^2 / kg$) και διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm.

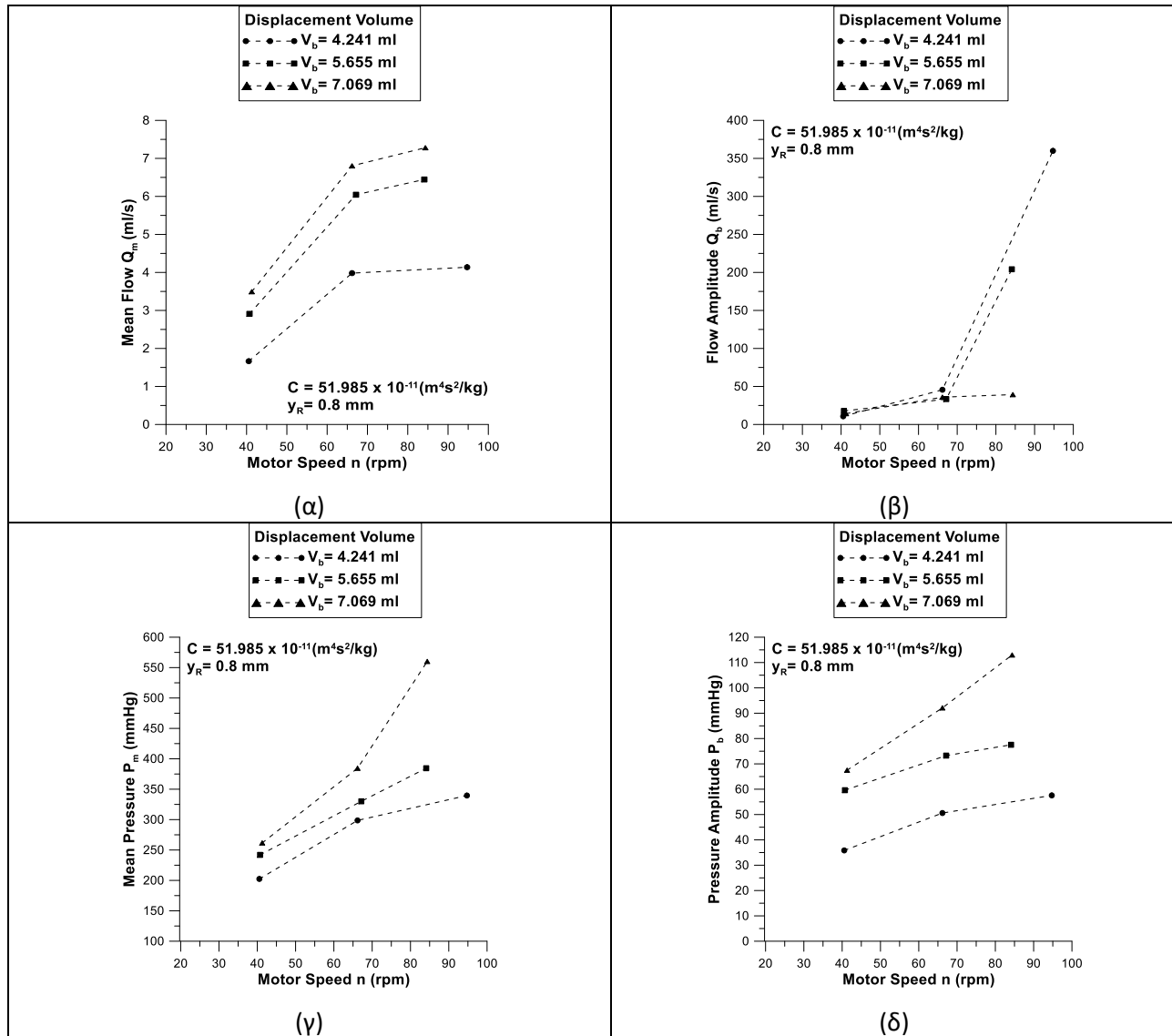
Σχόλια :

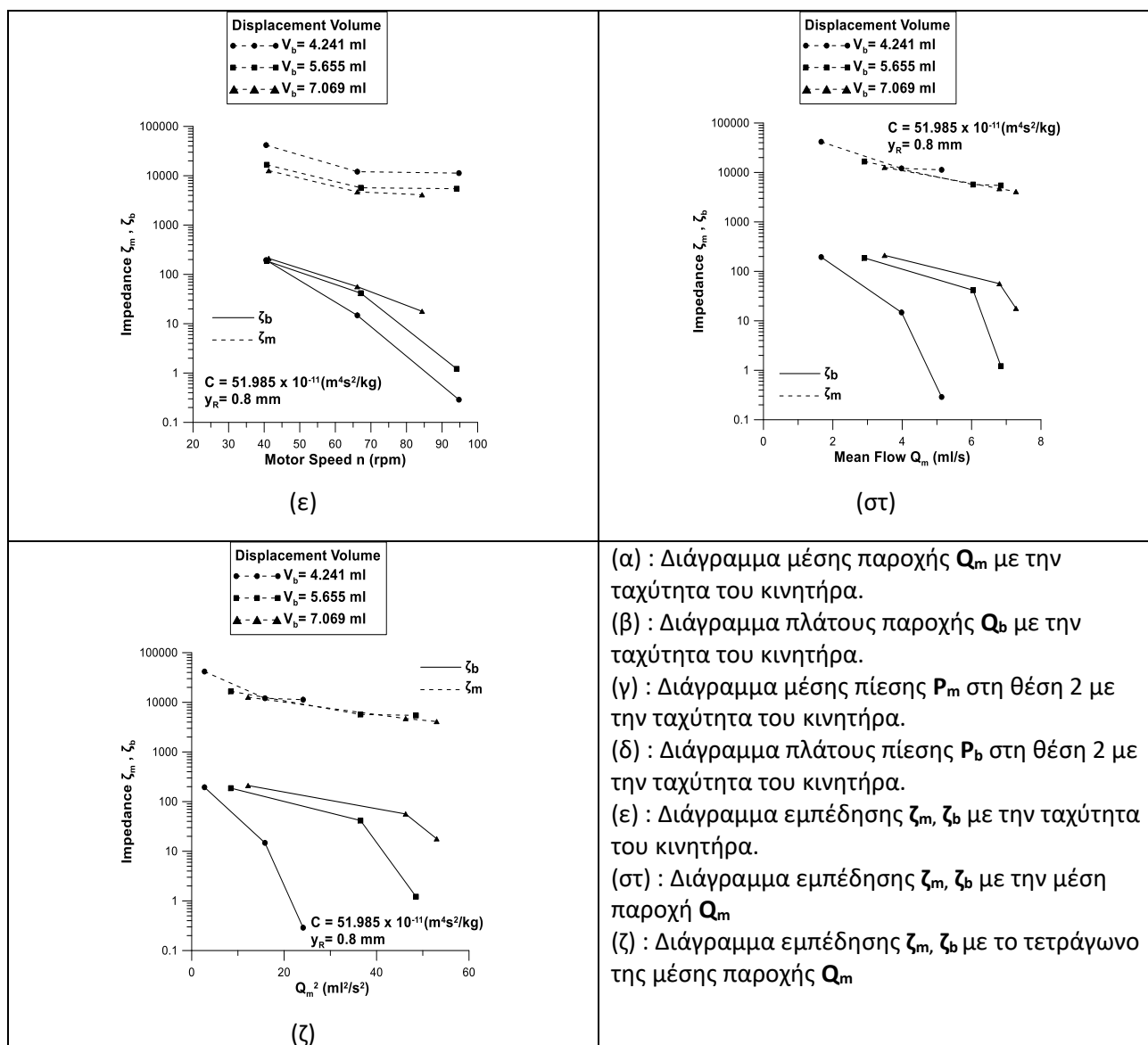
Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-26) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C=86,227$ ($\times 10^{-11} m^4 s^2 / kg$), έχοντας όγκο αέρα $V_a=88,3573$ ml στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b , ιδιαίτερα για $V_b=7,069$ ml, για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m, ζ_b

σε αντίθεση με τις άλλες μετρήσεις με σταθερά C και γ_R παρουσιάζουν μεταβολή και αυξάνονται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b και της ταχύτητας κινητήρα n /μέσης παροχής Q_m .

6.2-27: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 \times 10^{-11} \text{ m}^4\text{s}^2/\text{kg}$ και διάκενο βάνας πύλης $\gamma_R=0,8 \text{ mm}$.





Σχήμα 6.2-27: Διαγράμματα μεγεθών για ενδοτικότητα $C=51,985 (10^{-11} m^4 s^2 / kg)$ και διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm.

Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.2-27) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=0,8$ mm, ενώ η ενδοτικότητα C είναι $C= 51,985 (10^{-11} m^4 s^2 / kg)$, έχοντας όγκο αέρα $V_a= 53,0144$ ml στο δοχείο Windkessel. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για μικρότερους όγκους εμβολισμού V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b , ιδιαίτερα για $V_b=7,069$ ml, για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα. Επίσης αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα n . Οι ζ_m , ζ_b

σε αντίθεση με τις άλλες μετρήσεις με σταθερά C και y_R παρουσιάζουν μεταβολή και αυξάνονται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b και της ταχύτητας κινητήρα n /μέσης παροχής Q_m .

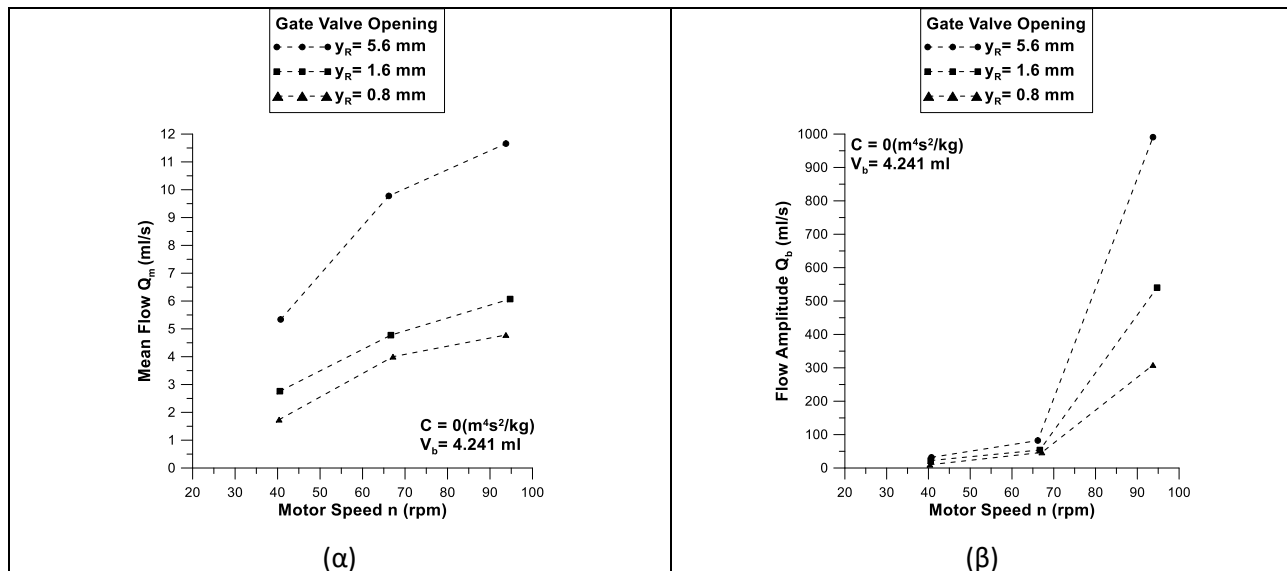
6.3 : Διαγράμματα Μηδενικής Ενδοτικότητας

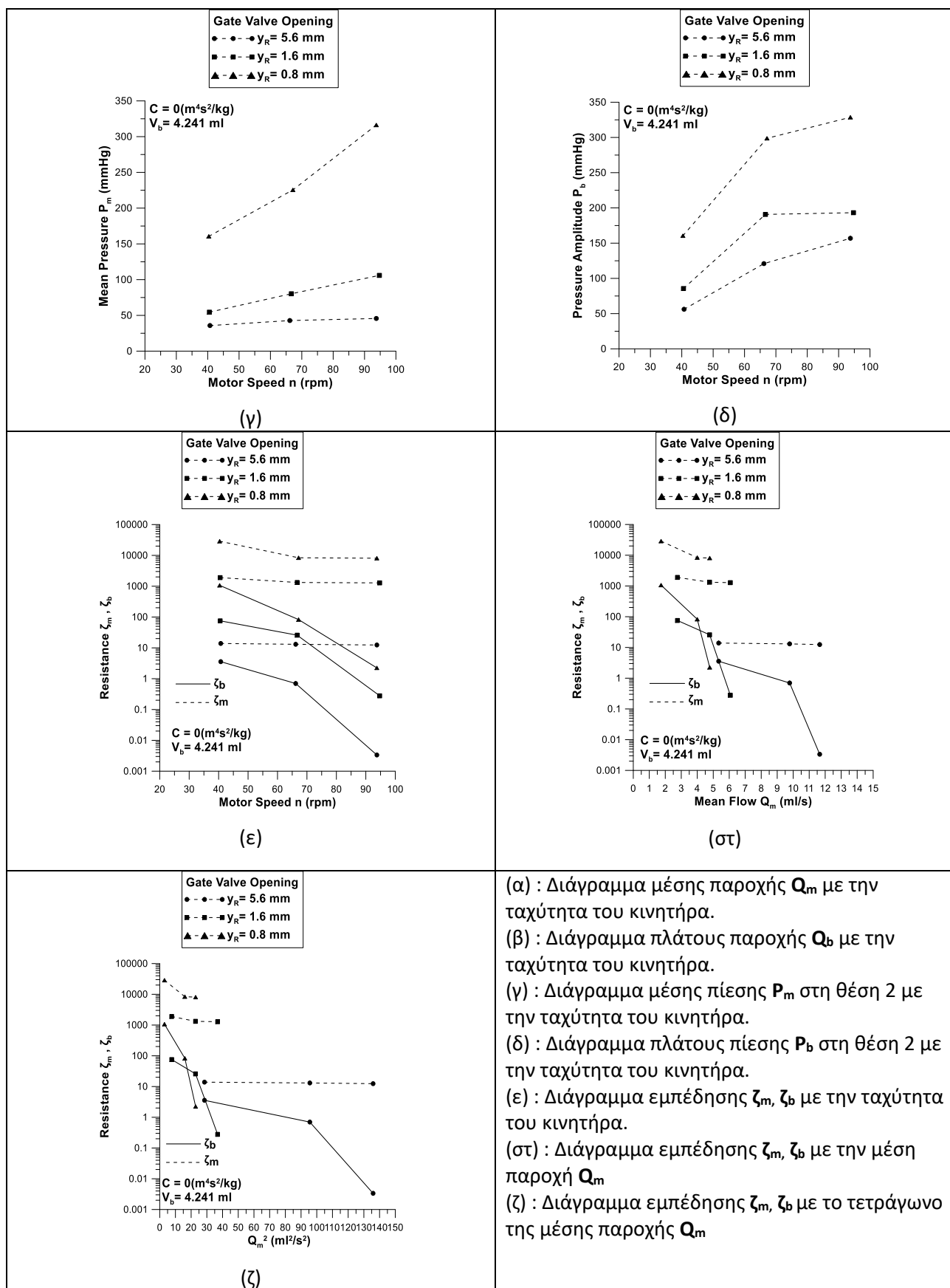
Οι ακόλουθες μετρήσεις πραγματοποιήθηκαν μετά από πλήρωση με νερό του δοχείου Windkessel. Συνεπώς, για τις μετρήσεις αυτές ισχύει ότι η ενδοτικότητα $C=0(m^4s^2/kg)$. Με μηδενική ενδοτικότητα, η αντίσταση στη ροή R_m ρυθμίζεται μόνο από τη μεταβολή του διάκενου βάνας πύλης y_R . Οι υπόλοιπες παράμετροι συνδυάζονται με όπως και στην παράγραφο 6.2.

Τα ακόλουθα διαγράμματα αφορούν τα εξής μεγέθη για κάθε μέτρηση:

- Διάγραμμα μέσης παροχής Q_m με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα πλάτους παροχής Q_b με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα μέσης πίεσης P_m στη θέση 2 με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα πλάτους πίεσης P_b στη θέση 2 με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα εμπέδησης ζ_m, ζ_b με την ταχύτητα κινητήρα n
- Διάγραμμα εμπέδησης ζ_m, ζ_b με την μέση παροχή Q_m
- Διάγραμμα εμπέδησης ζ_m, ζ_b με το τετράγωνο της μέσης παροχής Q_m

6.3-1: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.





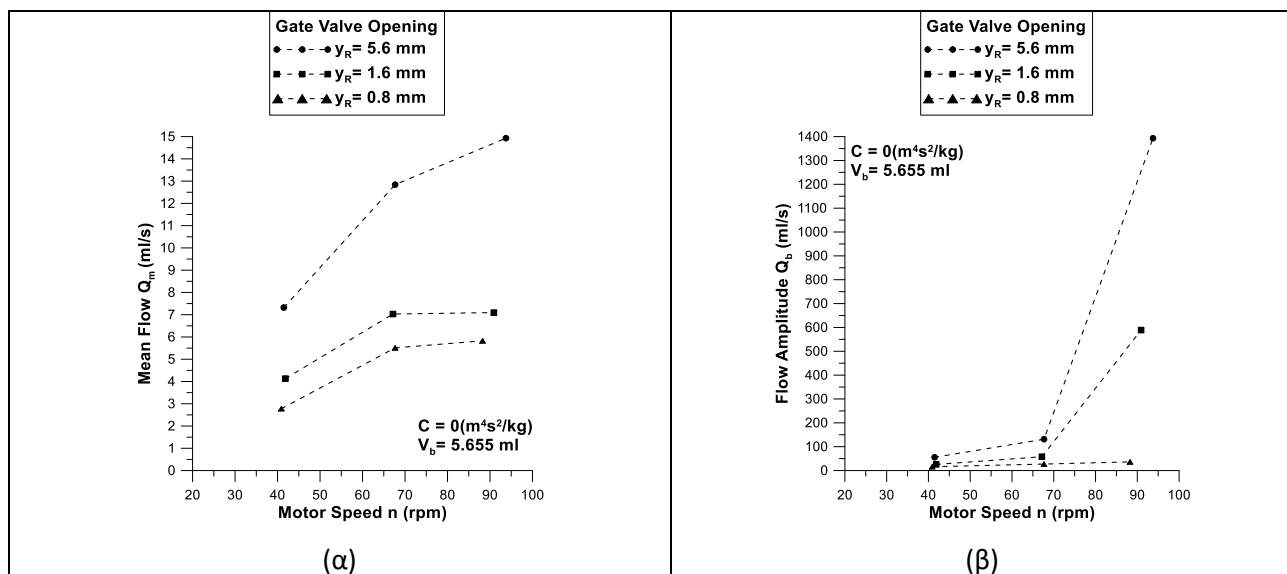
Σχήμα 6.3-1: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=4,241$ ml.

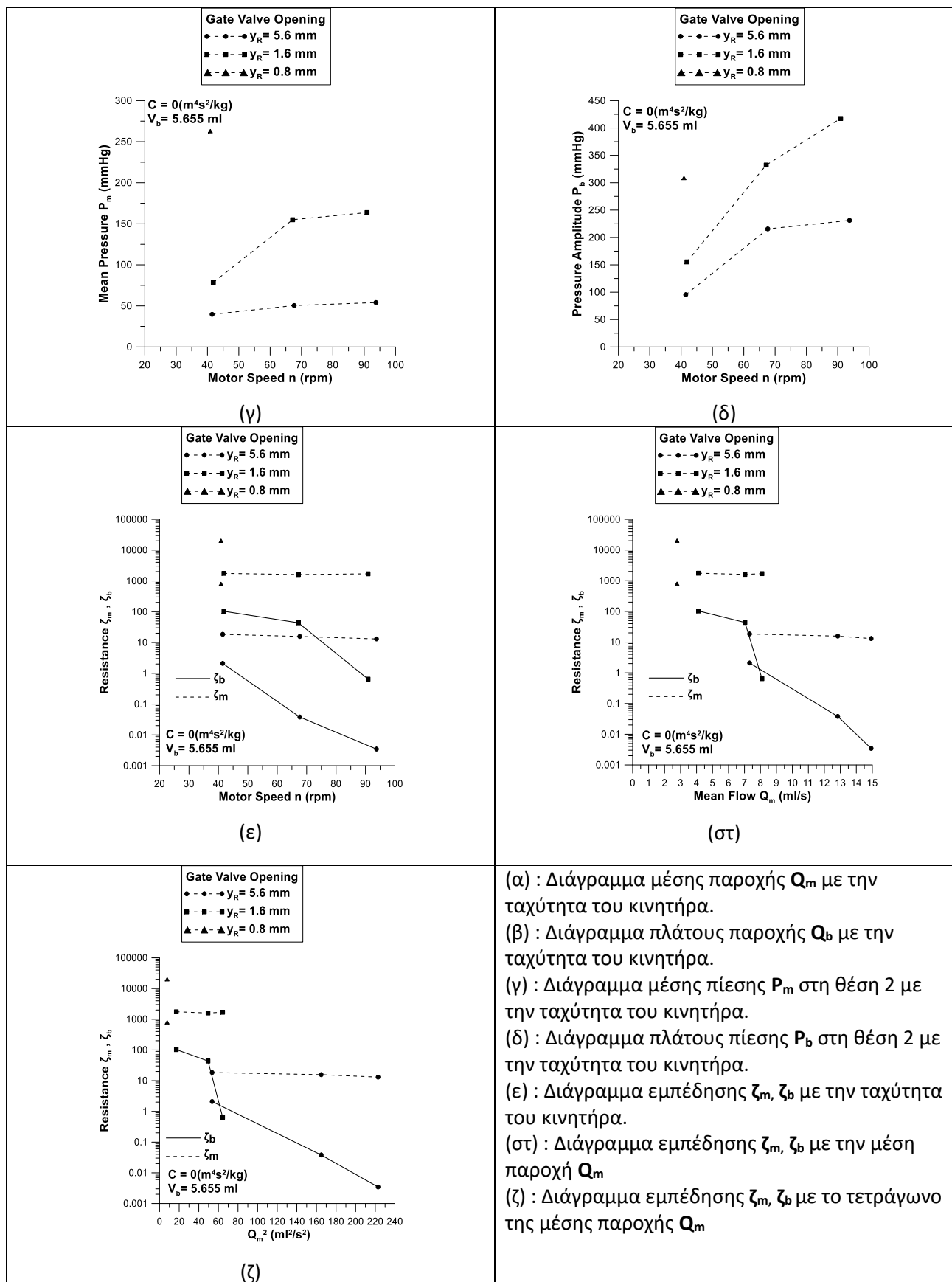
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.3-1) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=4,241$ ml, ενώ η ενδοτικότητα C είναι μηδενική, καθώς το δοχείο Windkessel έχει πληρωθεί με νερό. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα αλλά με μικρότερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 90,9-93,7 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (1363 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 64,2-67,7 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (104 ml/s). Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, αλλά ο ρυθμός αύξησης πέφτει καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Η εμπέδηση z_m , z_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που το δοχείο ενδοτικότητας είναι πληρωμένο, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι z_m , z_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η z_b .

6.3-2: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655$ ml.





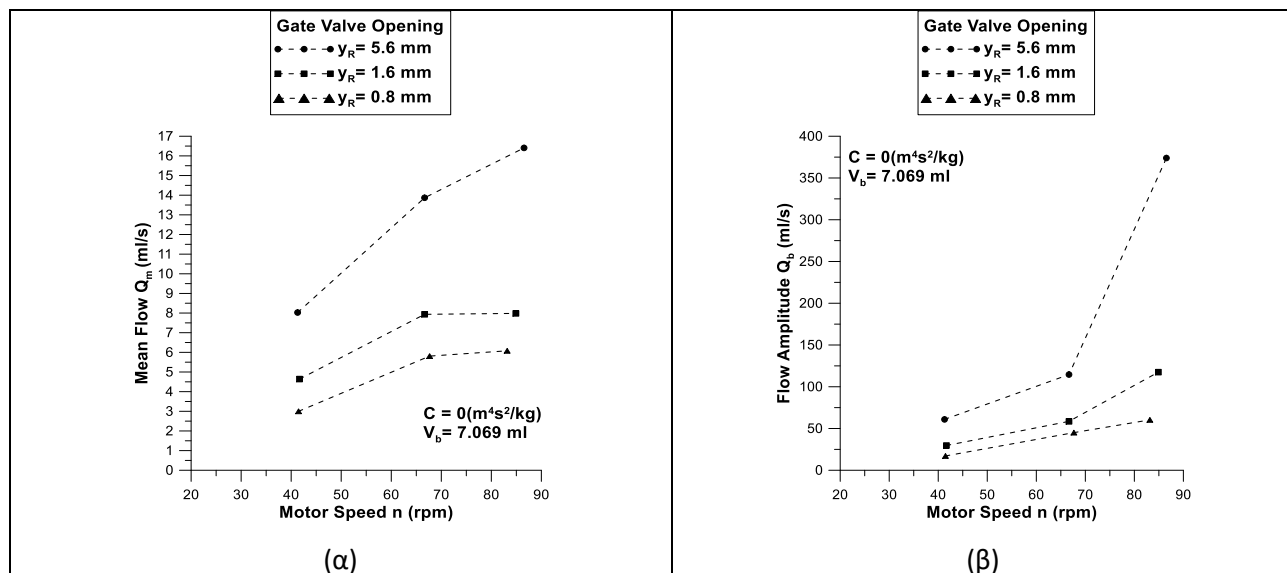
Σχήμα 6.3-2: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=5,655\text{ ml}$.

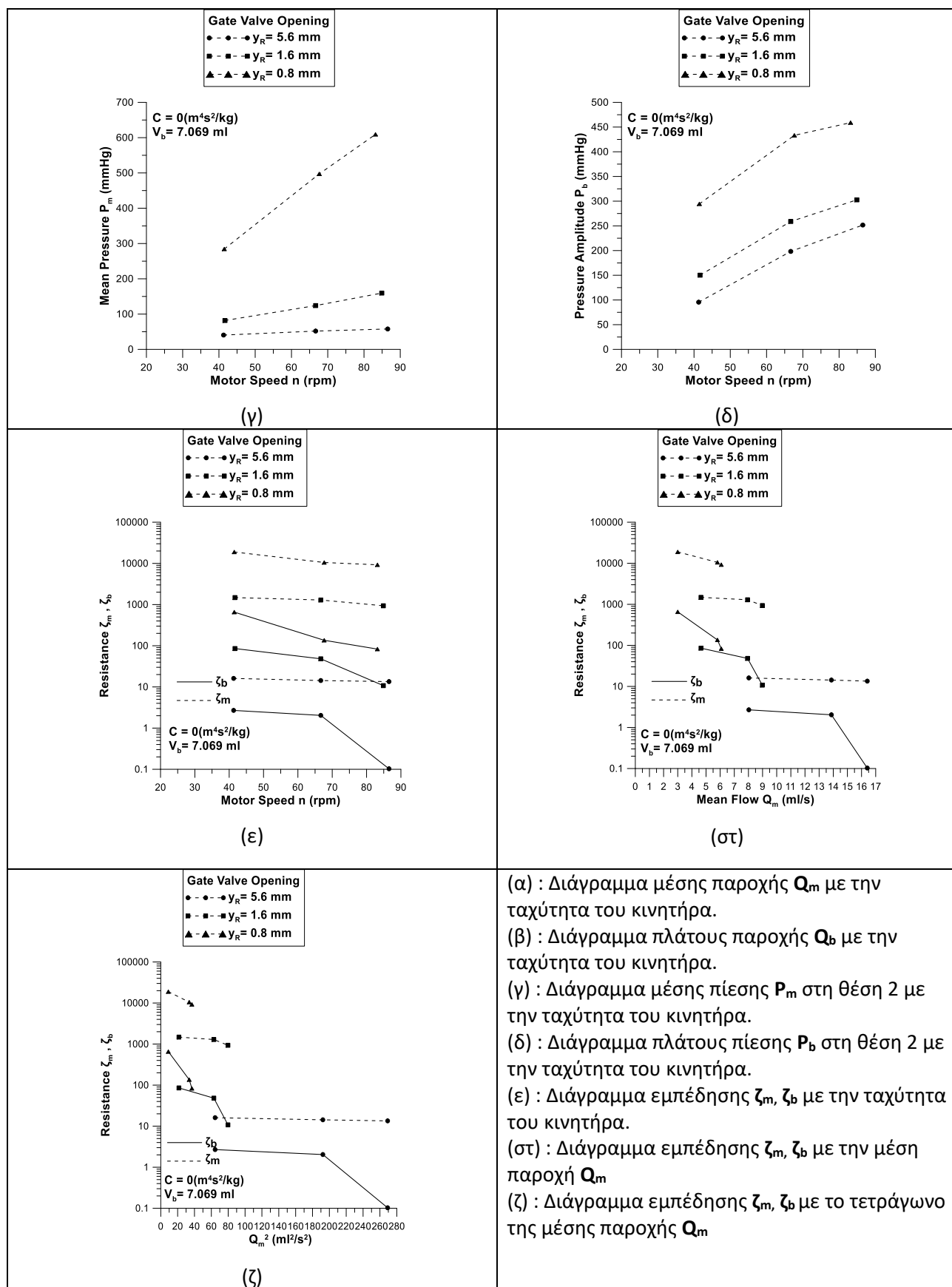
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.3-2) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=5,655$ ml, ενώ η ενδοτικότητα C είναι μηδενική, καθώς το δοχείο Windkessel έχει πληρωθεί με νερό. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα αλλά με μικρότερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 90,9-94,7 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (423 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 66,2-67,2 rpm) που είναι σημαντικά μικρότερο (36 ml/s). Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . (Ελλιπή στοιχεία για $y_R=0,4$ mm, λόγω τιμής πίεσης P_m στη θέση 2 εκτός εύρους αισθητήρα). Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, αλλά ο ρυθμός αύξησης πέφτει καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . (Ελλιπή στοιχεία για $y_R=0,4$ mm, λόγω τιμής πίεσης P_m στη θέση 2 εκτός εύρους αισθητήρα). Η εμπέδηση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που το δοχείο ενδοτικότητας είναι πληρωμένο, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.3-3: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069$ ml.





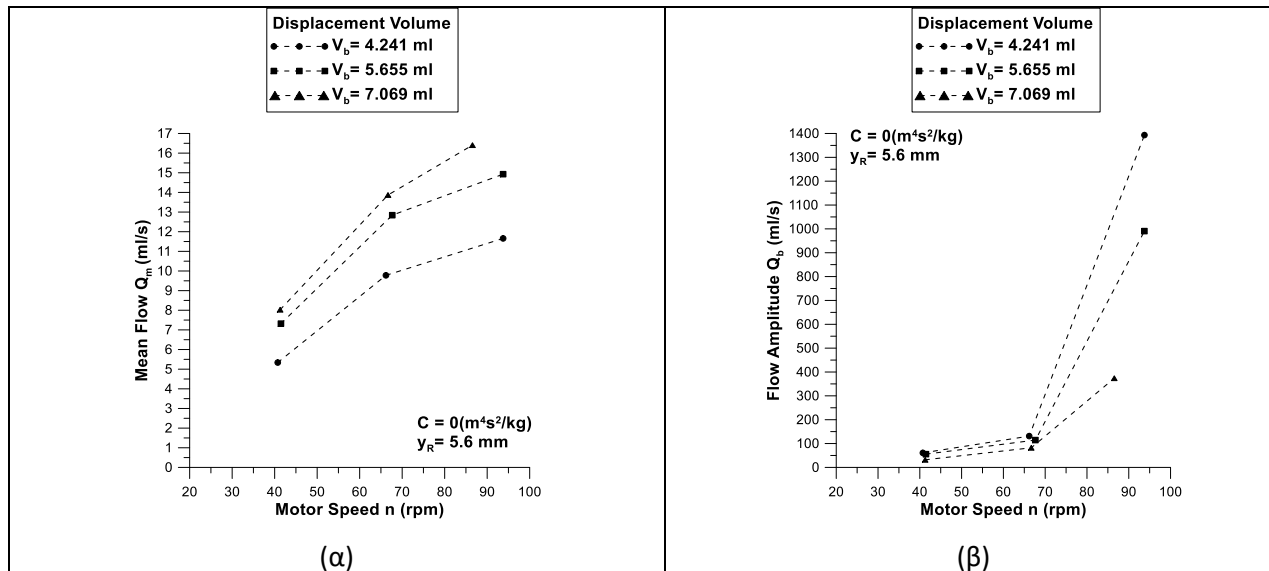
Σχήμα 6.3-3: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και όγκο εμβολισμού $V_b=7,069$ ml.

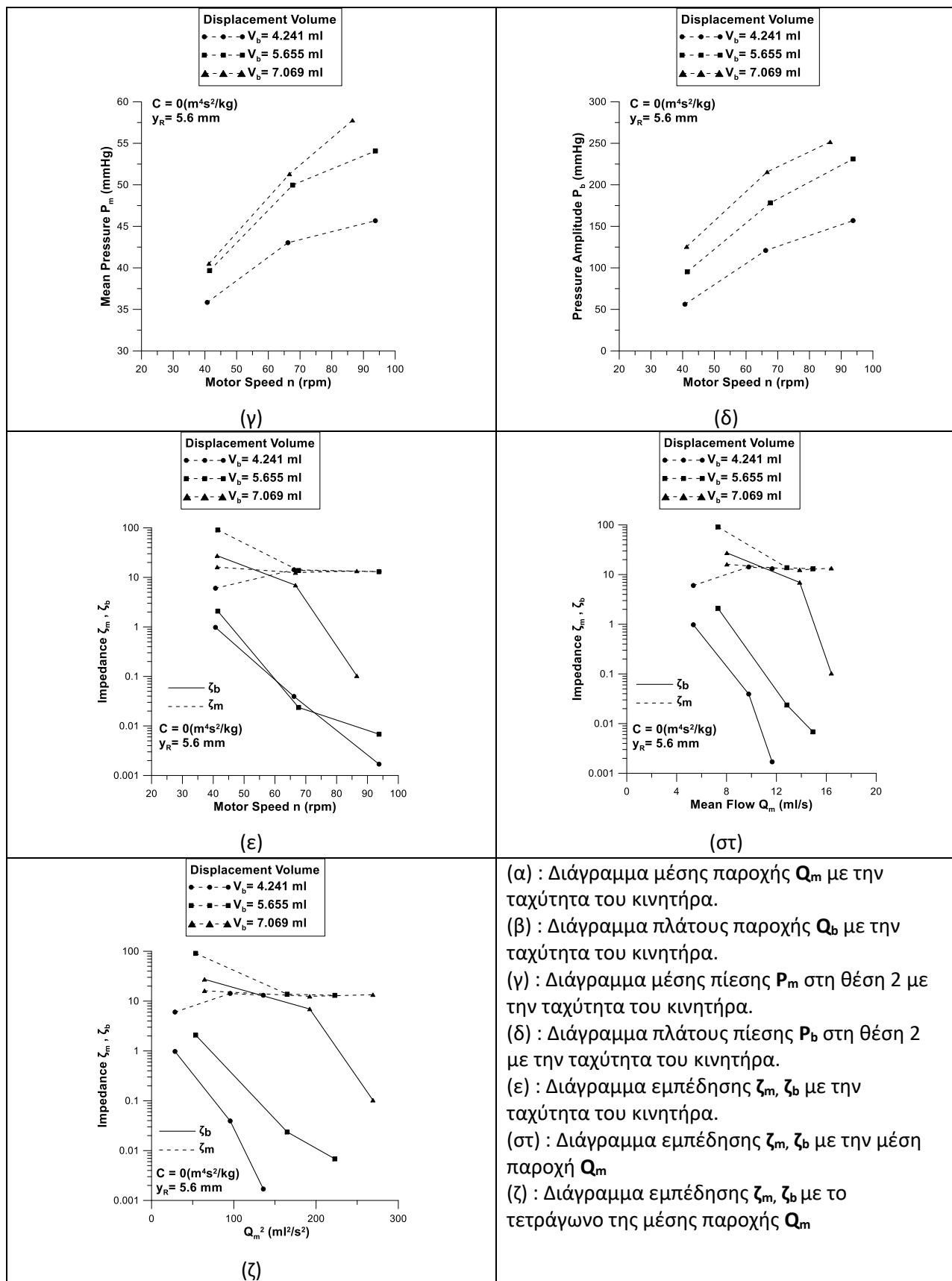
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.3-3) διατηρείται σταθερός ο όγκος εμβολισμού σε $V_b=7,069$ ml, ενώ η ενδοτικότητα C είναι μηδενική, καθώς το δοχείο Windkessel έχει πληρωθεί με νερό. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές ανοίγματος του διάκενου y_R της βάνας πύλης (Gate Valve Opening). Μεγαλύτερες τιμές διάκενου υποδεικνύουν μικρότερη αντίσταση ροής στην βάνα.

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα αλλά με μικρότερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επιπλέον, για υψηλές στροφές κινητήρα (εύρους 90,9-94,7 rpm) το πλάτος της παροχής είναι μεγάλο (313 ml/s) σε σχέση με τις χαμηλότερες (εύρους 66,7-67,7 rpm) που είναι μικρότερο (69 ml/s). Η διαφορά αυτή είναι μικρότερη σε σχέση με αυτές των μικρότερων πλατών V_b . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης ροής στη βάνα πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση της αντίστασης βάνας πύλης για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, αλλά ο ρυθμός αύξησης πέφτει καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Η εμπίεση ζ_m , ζ_b αυξάνεται με την μείωση του διάκενου y_R της βάνας πύλης, και ιδιαίτερα για την μικρότερη τιμή του y_R . Στη συγκεκριμένη περίπτωση που το δοχείο ενδοτικότητας είναι πληρωμένο, η βάνα πύλης είναι ο μόνος ρυθμιστής της αντίστασης στη ροή και η μεταβολή του διάκενου y_R επηρεάζει σημαντικά την αντίσταση στη ροή R_m . Παρατηρείται επίσης ότι οι ζ_m , ζ_b μειώνονται καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n ή η μέση παροχή Q_m , ιδιαίτερα η ζ_b .

6.3-4: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάνας πύλης $y_R=5,6$ mm.





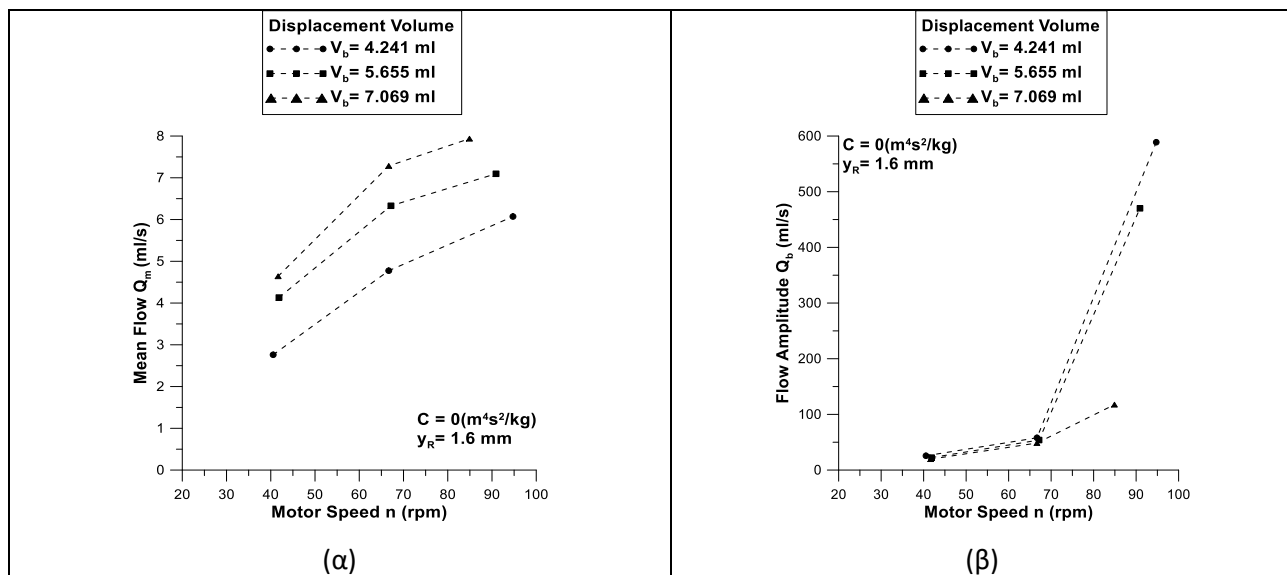
Σχήμα 6.3-4: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάνας πύλης $y_R=5,6 \text{ mm}$.

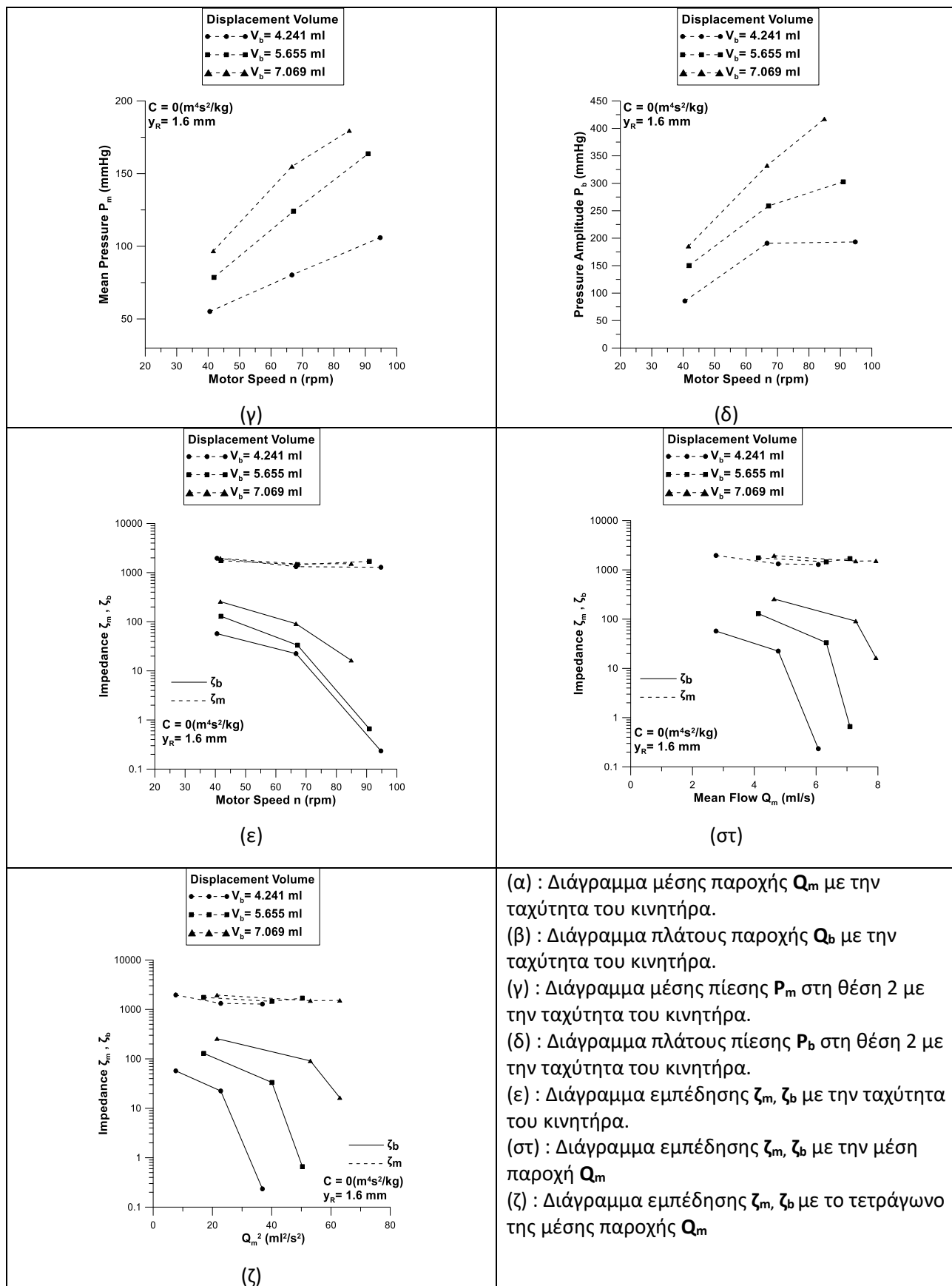
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.3-4) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάνα πύλης, με ύψος διάκενου βάνας πύλης $y_R=5,6$ mm ενώ η ενδοτικότητα C είναι μηδενική, καθώς το δοχείο Windkessel έχει πληρωθεί με νερό. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα αλλά με μικρότερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R , αλλά ο ρυθμός αύξησης πέφτει καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, αλλά ο ρυθμός αύξησης πέφτει καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Οι ζ_m , ζ_b μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάνας πύλης y_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

6.3-5: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάνας πύλης $y_R=1,6$ mm.





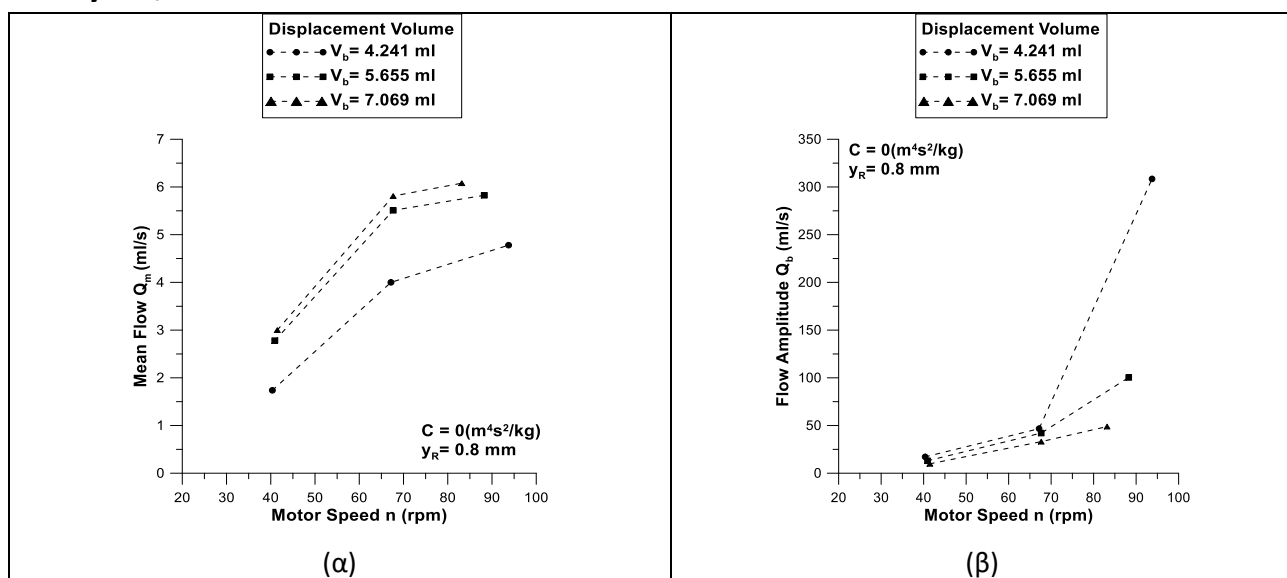
Σχήμα 6.3-5: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάνας πύλης $y_R=1,6$ mm.

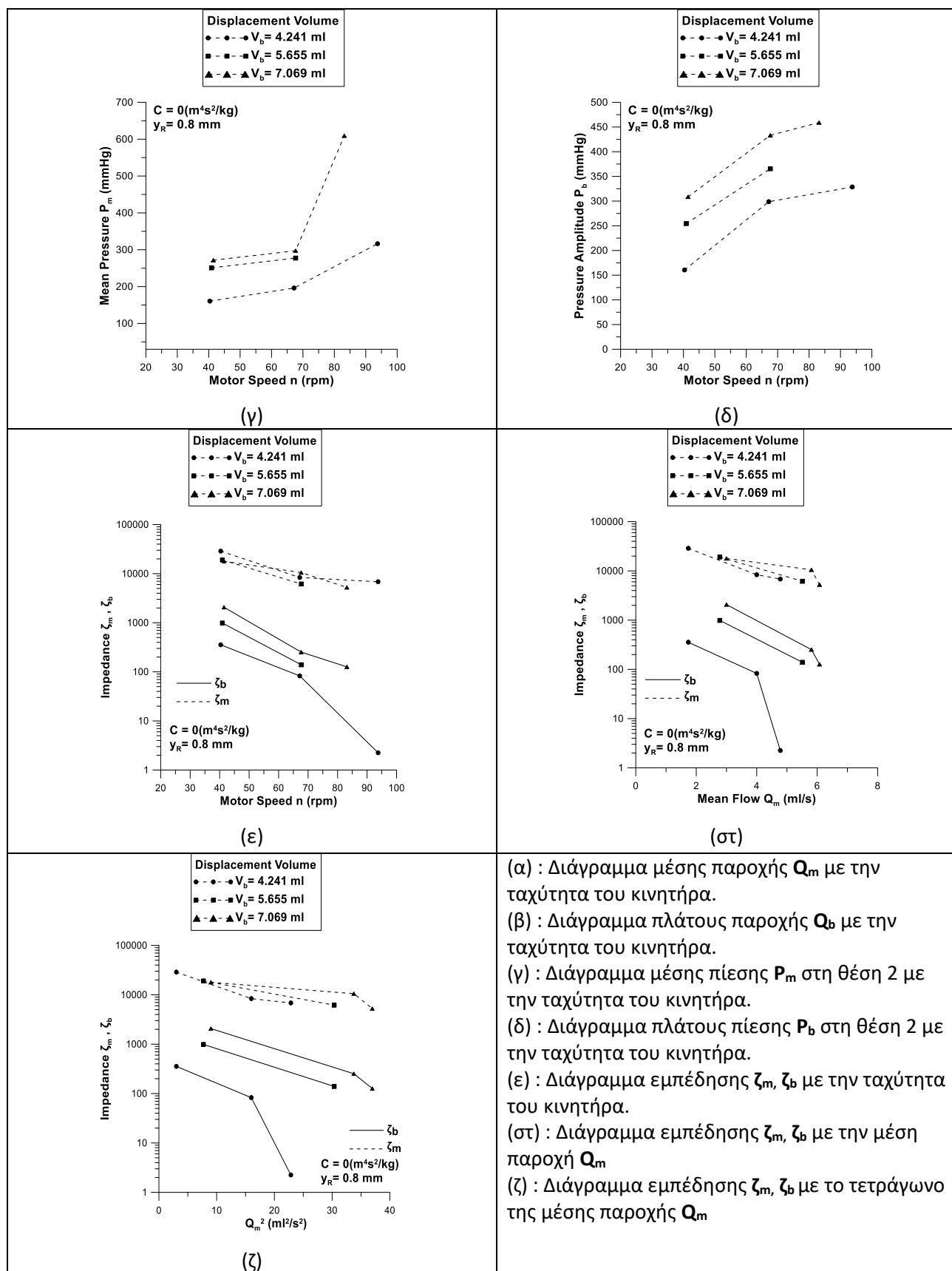
Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.3-5) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάννα πύλης, με ύψος διάκενου βάννας πύλης $y_R=1,6$ mm ενώ η ενδοτικότητα C είναι μηδενική, καθώς το δοχείο Windkessel έχει πληρωθεί με νερό. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα αλλά με μικρότερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, αλλά ο ρυθμός αύξησης πέφτει καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Οι ζ_m , ζ_b μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάννας πύλης y_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

6.3-6: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάννας πύλης $y_R=0,8$ mm.





Σχήμα 6.3-6: Διαγράμματα μεγεθών για μηδενική ενδοτικότητα και διάκενο βάνας πύλης $y_R=0,8 \text{ mm}$.

Σχόλια :

Στα παραπάνω διαγράμματα (Σχ. 6.3-6) διατηρείται σταθερή η αντίσταση ροής στη βάννα πύλης, με ύψος διάκενου βάννας πύλης $y_R=0,8$ mm ενώ η ενδοτικότητα C είναι μηδενική, καθώς το δοχείο Windkessel έχει πληρωθεί με νερό. Υπό αυτές τις συνθήκες δοκιμάζονται διαφορετικές τιμές όγκου εμβολισμού V_b .

Υπό τις συνθήκες αυτές παρατηρούνται ότι, η μέση παροχή Q_m αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής κινητήρα n . Επιπλέον, παρατηρείται αύξηση της παροχής συναρτήσει των στροφών του κινητήρα αλλά με μικρότερο ρυθμό καθώς αυξάνουν οι στροφές του κινητήρα n . Το πλάτος παροχής Q_b μειώνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n και ιδιαίτερα στην μεγαλύτερη ταχύτητα περιστροφής. Επίσης παρατηρείται μεγαλύτερη αύξηση για υψηλότερες στροφές περιστροφής n . Η μέση πίεση P_m στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα n . Επίσης, παρατηρείται ότι η μέση πίεση αυξάνεται με την αύξηση των στροφών του κινητήρα για κάθε y_R . (Ελλιπή στοιχεία για $V_b=5,655$ ml, λόγω τιμής πίεσης P_m στη θέση 2 εκτός εύρους αισθητήρα). Το πλάτος πίεσης P_b στη θέση 2 αυξάνεται με την αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b για κάθε ταχύτητα περιστροφής του κινητήρα, αλλά ο ρυθμός αύξησης πέφτει καθώς γίνεται μετάβαση στις υψηλότερες στροφές περιστροφής n . (Ελλιπή στοιχεία για $V_b=5,655$ ml, λόγω τιμής πίεσης P_m στη θέση 2 εκτός εύρους αισθητήρα). Οι ζ_m, ζ_b μεταβάλλονται ελάχιστα με την αύξηση των στροφών του κινητήρα ή με την του όγκου εμβολισμού V_b . Αυτό είναι αναμενόμενο διότι και οι δύο ρυθμιστές της αντίστασης στην ροή, η ενδοτικότητα C και το διάκενο βάννας πύλης y_R παραμένουν σταθερά για αυτές τις μετρήσεις.

Κεφάλαιο 7: Συμπεράσματα

Στο κεφάλαιο αυτό τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας μελετώνται για να βρεθούν οι τάσεις που έχουν τα ρευστομηχανικά μεγέθη κατά τη μεταβολή τους. Στην συνέχεια τα αποτελέσματα των μετρήσεων συγκρίνονται με τα αντίστοιχα μεγέθη στην σχετική βιβλιογραφία, επιβεβαιώνοντας την αξιοπιστία του μοντέλου προσομοίωσης.

7.1: Τάσεις στην μεταβολή των μεγεθών

Οι τάσεις που παρουσιάζονται στη μεταβολή μεγεθών συνοπτικά είναι οι ακόλουθες:

Η αύξηση της παροχής και η αύξηση της πίεσης P στην θέση 2 με μείωση της εμπίεσης ζ της διάταξης, με την αύξηση της συχνότητας εμβολισμού και του όγκου εμβολισμού. Συγκεκριμένα, αύξηση της συχνότητας εμβολισμού προκαλεί προφανώς αύξηση της μέσης παροχής Q_m και μεγάλη αύξηση του πλάτους παροχής Q_b . Τόσο η μέση πίεση P_m , όσο και το εύρος πίεσης P_b αυξάνονται σε μεγαλύτερες συχνότητες εμβολισμού. Γενικά η εμπίεση στη ροή ζ μειώνεται με την παροχή, με το εύρος ζ_b να μειώνεται σε μεγαλύτερο βαθμό από την μέση εμπίεση ζ_m . Η αύξηση του όγκου εμβολισμού V_b προκαλεί αύξηση στην πίεση σε μεγαλύτερο βαθμό στο πλάτος P_b από ότι στη μέση τιμή P_m , αντιθέτως προκαλεί την μείωση του εύρους της παροχής Q_b και την αύξηση του εύρους της εμπίεσης ζ_b , ωστόσο επηρεάζει ελάχιστα την μέση εμπίεση ζ_m .

Η αύξηση της ενδοτικότητας C προκαλεί μείωση της μέσης παροχής Q_m και μικρή αύξηση του πλάτους παροχής Q_b . Επίσης, προκαλεί μείωση της μέσης πίεσης P_m και του πλάτους πίεσης P_b . Έχει ελάχιστη επίπτωση στη μέση εμπίεση της διάταξης ζ_m , αλλά η αύξησή της προκαλεί μικρή μείωση στο εύρος της εμπίεσης ζ_b . Επιπλέον, η ενδοτικότητα φαίνεται να συνδέεται με τον ρυθμό αύξησης και μείωσης των διάφορων μεγεθών.

Τέλος, μείωση του διακένου y , της βάνας πύλης έχει τα αναμενόμενα αποτελέσματα της μείωσης της μέσης παροχής Q_m , της αύξησης τόσο της πίεσης P όσο και της εμπίεσης ζ της διάταξης κατά πλάτος και κατά τη μέση τιμή.

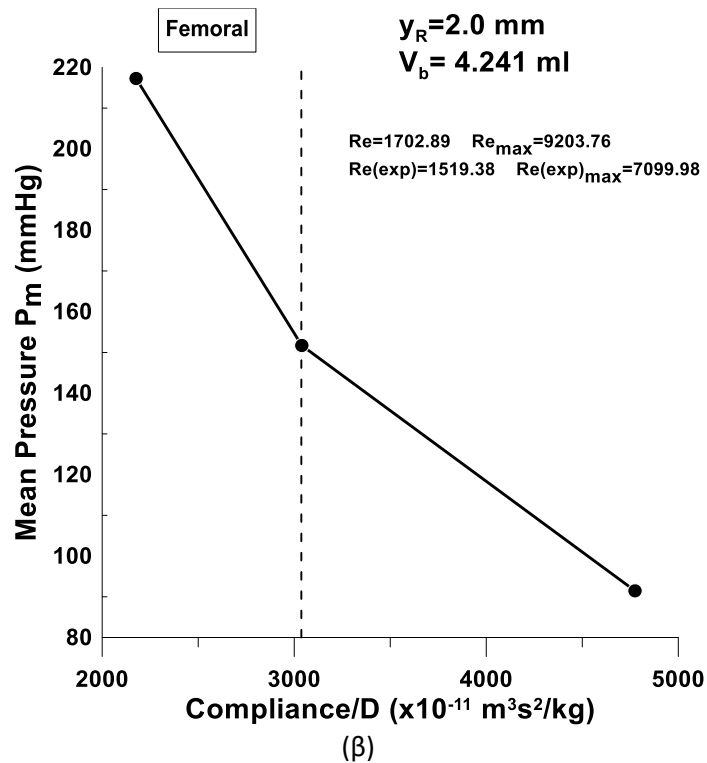
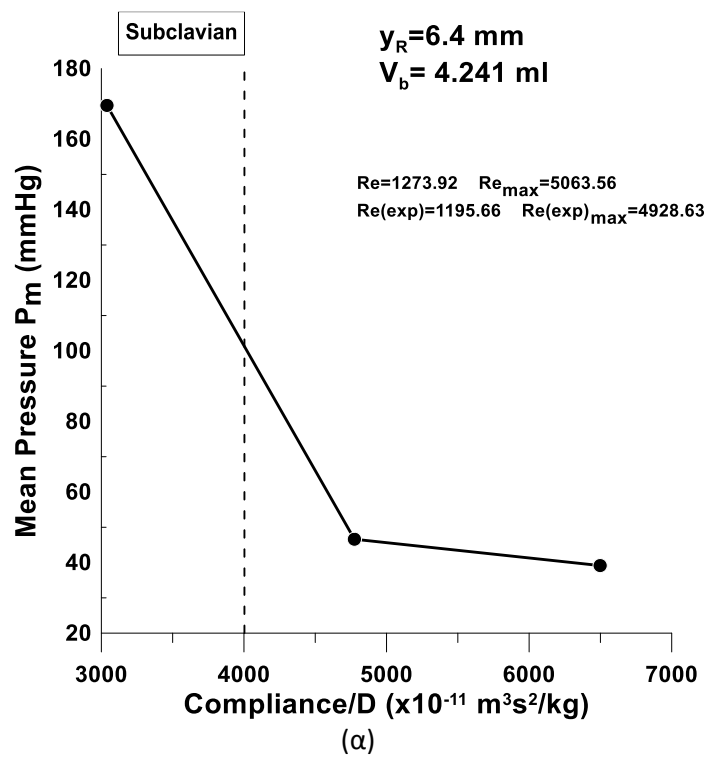
7.2: Σύγκριση με πραγματικά μεγέθη

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων εντάσσονται στα φυσιολογικά μεγέθη της βιβλιογραφίας και επικυρώνεται η αξιοπιστία του πειραματικού μοντέλου προσομοίωσης και της μεθόδου στην παθοφυσιολογία.

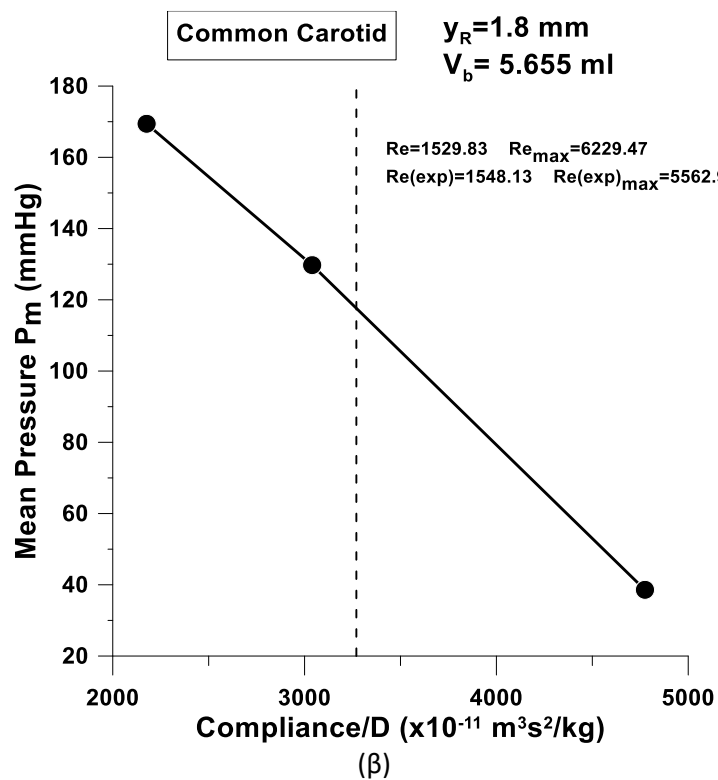
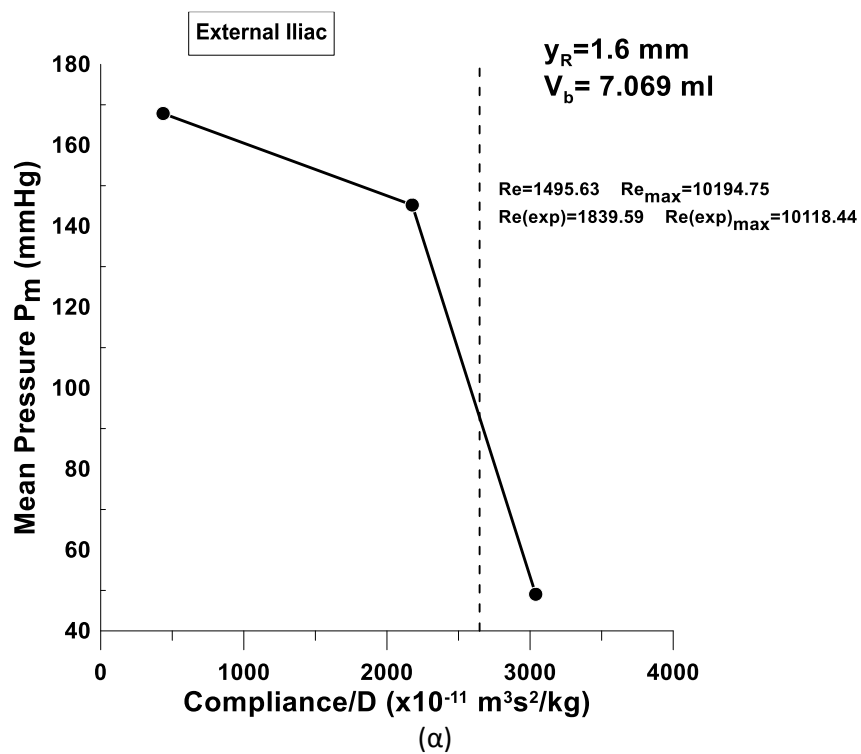
Λόγω του μεγάλου εύρους των μετρήσεων οι τιμές που προέκυψαν στο σύνολο των μετρήσεων περιλαμβάνουν τις τιμές που παρουσιάζονται στην ανθρώπινη φυσιολογία σύμφωνα με την βιβλιογραφία.

Κριτήριο της αξιοπιστίας του πειραματικού μοντέλου είναι να μπορέσει να πλησιάσει τα φυσιολογικά μεγέθη όχι μόνο μεμονωμένα, αλλά συνδυαστικά.

Στα ακόλουθα διαγράμματα τα ρευστομηχανικά στοιχεία από την βιβλιογραφία (κεφ. 3.2-2) τοποθετούνται μαζί με τα αποτελέσματα των μετρήσεων με ταχύτητα κινητήρα $n \approx 60\text{RPM}$, καθώς η βιβλιογραφία αναφέρεται σε φυσιολογική λειτουργία της καρδιάς (60-70 bpm). Έπειτα αναδεικνύεται η τάση γήρανσης (σκλήρυνση) της εκάστοτε αρτηρίας όπου με μείωση της ενδοτικότητας πειραματικά δείχνεται η αύξηση της πίεσης, έχοντας ως αφετηρία τη φυσιολογική ενδοτικότητα της αρτηρίας ανηγμένη στη διάμετρό της. Οι τιμές της αντίστασης και του εμβολισμού ρυθμίζονται με τρόπο ώστε να επιτυγχάνεται η φυσιολογική τιμή της παροχής αίματος στην αρτηρία, θεωρώντας ότι η αιμάτωση των ιστών που αρδεύει η αρτηρία παραμένει σταθερή με τη γήρανση λόγω της ίδιας ανάγκης των ιστών σε αίμα.



Σχήμα 7.2-1: Τάση γήρανσης (σκλήρυνση) υποκλείδιου αρτηρίας (α) και μηριαίας αρτηρίας (β) όπου με μείωση της ενδοτικότητας αυξάνει η πίεση. Κατακόρυφες διακεκομμένες: φυσιολογικές ενδοτικότητες αρτηριών ανηγμένες στη διάμετρό τους (Stergiopoulos,1992).



Σχήμα 7.2-2: Τάση γήρανσης (σκλήρυνση) έξω λαγονίου (α) και κοινής καρωτίδας (β) όπου με μείωση της ενδοτικότητας αυξάνει η πίεση. Κατακόρυφες διακεκομμένες: φυσιολογικές ενδοτικότητες αρτηριών ανηγμένες στη διάμετρό τους (Stergiopoulos,1992).

7.3: Μελλοντική έρευνα

Ένα επόμενο στάδιο έρευνας με χρήση της συγκεκριμένης διάταξης είναι να προλεχθεί πειραματικά η συμπεριφορά του φαινομένου υπό την γνώση της επίδρασης της χρονικής μεταβολής της ενδοτικότητας καταγράφοντας στιγμιότυπα της στάθμης του ρευστού στο δοχείο windkessel με μια κάμερα. Κατά αυτόν τον τρόπο θα αναδειχθούν επιδράσεις της χρονικής μεταβολής της ενδοτικότητας πάνω στα ρευστομηχανικά μεγέθη της πίεσης και της παροχής για αυτό το σύστημα.

Σκοπός της παρούσας εργασίας είναι η καταγραφή και η ανάδειξη όλων των παραμέτρων που επηρεάζουν το σύστημα. Πρόκειται για ένα πολυπαραμετρικό σύστημα όπου επηρεάζεται από την αδράνεια του ρευστού, την αντίσταση στη ροή, την ενδοτικότητα του συστήματος, τη διαφορά υδροστατικής πίεσης μεταξύ εισόδου και εξόδου, τη συχνότητα πάλμωσης της ροής, το πλάτος πάλμωσης της ροής, την ύπαρξη ή όχι βαλβίδων στο σύστημα, την χωρική τοποθέτηση των στοιχείων αντίστασης και ενδοτικότητας σχετικά με τη διέγερση κλπ. Για το λόγο αυτό η λεπτομερής καταγραφή ώστε καλυφθεί ολόκληρο το φάσμα μετρήσεων για κάθε συνδυασμό των παραμέτρων απαιτεί πολύ μεγάλο πλήθος δοκιμών που χρονικά δεν μπορεί να πραγματοποιηθεί στα πλαίσια μιας μόνο διπλωματικής εργασίας. Ωστόσο, στην παρούσα έχει καλυφθεί ένα πολύ μεγάλο εύρος συνδυασμών των παραμέτρων για να αναδειχθεί η τάση του συστήματος. Θα πρέπει στις περιπτώσεις που παρουσιάζουν κάποιο ενδιαφέρον π.χ. βιοϊατρικό να γίνει εστίαση με περισσότερο αριθμό μετρήσεων για να αναδειχθούν οι επιδράσεις της κάθε περίπτωσης με περισσότερη λεπτομέρεια.

Τέλος, παρόλες τις πολλές παραμέτρους που επιδρούν στη συμπεριφορά του συστήματος αυτό παραμένει απλό και συνίσταται από απλά στοιχεία αντίστασης, ενδοτικότητας κλπ., ώστε να μπορεί εύκολα να μοντελοποιηθεί θεωρητικά σε μηδενικής (συγκεντρωμένων παραμέτρων), μίας, δύο και τριών διαστάσεων για την ανάδειξη της συμπεριφοράς τέτοιων μοντέλων από φυσικής και μαθηματικής άποψης. Μια τέτοια μοντελοποίηση έχει αμφίδρομο σκοπό, να πιστοποιεί τα πειραματικά αποτελέσματα και να εισάγει στα ίδια τα μοντέλα συντελεστές που να τα καθιστά ρεαλιστικά για πρόλεξη παρόμοιων φαινομένων.

Τμήμα της παρούσας εργασίας παρουσιάστηκε στο 8^ο Πανελλήνιο Συνέδριο Βιοϊατρικής Τεχνολογίας που έλαβε χώρα στις 9-10 Μαΐου 2019 στην Αθήνα με διοργάνωση της Ελληνικής Εταιρείας Βιοϊατρικής Τεχνολογίας (ΕΛΕΒΙΤ). Εκτεταμένη περίληψη της εργασίας περιλαμβάνεται στο παράρτημα στο τέλος.

Κεφάλαιο 8: Βιβλιογραφία

- 1) Caro C. G., Pedley T. J., Schroter R. C., Seed W. A., Parker K. H., The Mechanics of the Circulation, 2nd edition, Cambridge University Press, 2012.
- 2) Le Gallois J. C., Experiments on the principle of life, and particularly on the principle of the motions of the heart, and on the seat of this principle: including the report made to the first class of the Institute, upon the experiments relative to the motions of the heart, Published by M. Thomas, William Fry, Printer, Philadelphia, pp, 328, 1813.
- 3) Hall D. P., Moreno J. R., Dennis C., Senning A., An experimental study of prolonged left heart bypass without thoracotomy, *Ann Surg.*, 156: 190–196, 1962.
- 4) Cooley D. A., Liotta D., Hallman G. L., Bloodwell R. D., Leachman R. D., Milam J. D., Orthotopic cardiac prosthesis for two-staged cardiac replacement, *Am J Cardiol.*, 24(5): 723-730, 1969.
- 5) Deutsch S. J., Tarbell J. M., Manning K. B., Rosenberg G., Fontaine A. A., Experimental Fluid Mechanics of Pulsatile Artificial Blood Pumps, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 38: 65-86, 2006.
- 6) Liebau G., Prinzipien kombinierter ventilloser Pumpen, abgeleitet vom menschlichen Blutkreislauf, *Naturwissenschaften*, 42: 339, 1955.
- 7) Takagi S., Saijo T., Study of a Piston Pump without Valves (1st Report, On a Pipe-capacity-system with a T-junction), *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 26(218), 1366-1372, 1983.
- 8) Takagi S., Takahashi K., Study of a Piston Pump without Valves (2nd Report, Pumping Effect and Resonance in a Pipe-capacity-system with a T-junction), *Bulletin of the Japan Society of Mechanical Engineers*, 28(239), 831-836, 1985.
- 9) Hales S., Statical Essays containing Haemastaticks or An Account of some Hydraulick and Hydrostatical Experiments made on the Blood and Blood-Vessels of Animals, 1733.
- 10) Frank O., Die Grundform des arteriellen Pulses, *Zeitschrift für Biologie*, 37, 483-526, 1899.
- 11) Sagawa K., Lie R. K., Schaefer J., Translation of Otto Frank's paper "Die Grundform des Arteriellen Pulses" *Zeitschrift für Biologie* 37: 483-526 (1899)", *J. Mol. Cell. Cardiol.*, 22 (3), 253–277, 1990.
- 12) Westerhof N., Stergiopulos N., Noble M. I. M., Snapshots of Hemodynamics, 2nd edition, Springer, 2010.
- 13) Mills C. J., Gabe I. T., Gault J. H., Mason D. T., Ross J. Jr., Braunwald E., Shillingford J. P., Pressure-flow relationships and vascular impedance in man, *Cardiovasc Res.*, 4(4), 405-417, 1970.
- 14) Stergiopulos N., Young D. F. and Rogge T. R., Computer simulation of arterial flow with applications to arterial and aortic stenosis, *J. Biomech.*, 25(12), 1477-1488, 1992.
- 15) Noordergraaf A., Verdouw P. D., Boom H. B. K., The use of an analog computer in a circulation model, *Progress in Cardiovascular Diseases*, 5(5), 419 – 439, 1963.
- 16) Arabia M., Akutsu T., A new test circulatory system for research in cardiovascular engineering, *Ann Biomed Eng.*, 12(1), 29-48, 1984.
- 17) Schima H., Tsangaris S., Zilla P., Kadletz M., Wolner E., Mechanical simulation of shear stress on the walls of peripheral arteries, *J Biomech.*, 23(8), 845-851, 1990.
- 18) Avolio A. P., Multi-branched model of the human arterial system, *Med Biol Eng Comput.*, 18(6), 709-718, 1980.
- 19) Olufsen M. S., Peskin C. S., Kim W. Y., Pedersen E. M., Nadim A., Larsen J., Numerical Simulation and Experimental Validation of Blood Flow in Arteries with Structured-Tree Outflow Conditions, *Ann Biomed Eng.*, 28(11), 1281-1299, 2000.
- 20) Figueroa C. A., Taylor C. A., Yeh V., Chiou A. J., Zarins C. K., Effect of Curvature on Displacement Forces Acting on Aortic Endografts: A 3-Dimensional Computational Analysis, *J Endovasc Ther.*, 16(3), 284-294, 2009.
- 21) Vignon-Clementel I. E., Figueroa C. A., Jansen K. E., Taylor C. A., Outflow boundary conditions for three-dimensional finite element modeling of blood flow and pressure in arteries, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(29–32), 3776-3796, 2006.
- 22) Cheng C. P., Herfkens R. J., Taylor C. A., Comparison of abdominal aortic hemodynamics between men and women at rest and during lower limb exercise, *J Vasc Surg.*, 37(1), 118-123, 2003.

- 23) B. G. J. L. H. M. H. e. a. Amsterdam EA, Clinical assessment of external pressure circulatory assistance in acute myocardial infarction. Am J Cardiol 1980.
- 24) Christopher P. Cheng, MS, Robert J. Herfkens, MD, and Charles A. Taylor, PhD, Comparison of abdominal aortic hemodynamics between men and women at rest and during lower limb exercise-2002
- 25) Mette S. Olufsen, Structured tree outflow condition for blood flow in larger systemic arteries- 1999
- 26) M. I. Qamar, A. E. Read, R. Skidmore, J. M. Evans, P. N. T. Wells, Transcutaneous Doppler ultrasound measurement of superior mesenteric artery blood flow in man-1986
- 27) Philippe Reymond, Pressure and Flow Wave Propagation in Patient-Specific Models of the Arterial Tree- 2011
- 28) Rideout V.C., Dick D.E., Difference-Differential Equations for Fluid Flow in Distensible Tubes-1967
- 29) Frederick Snyder e.a., Changes in respiration, heart rate and systolic blood pressure in human sleep-1964
- 30) Sumio Uematsu M.D. e.a., Measurement of Carotid Blood Flow in Man and its Clinical Application-1983
- 31) Τσαγγάρης Σ., Μηχανική των ρευστών-2005
- 32) Μανόπουλος Χ.Γ., Μελέτη αντλητικών φαινομένων σε ιατροβιολογικές εφαρμογές, μέσω αλληλεπίδρασης ροής ρευστού και κίνησης σώματος- 2009

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF BLOOD PRESSURE RISE IN VASCULAR AGING

C. Manopoulos*, D. Patrikios*, S. Tsangaris*, D. Mathioulakis**

* Laboratory of Biofluid Mechanics & Biomedical Engineering, School of Mechanical Engineering, National Technical University of Athens, Greece

** ICARE, Huazhong University of Science and Technology Wuhan, China

manopoul@central.ntua.gr

Introduction

The diseases of the circulatory system have ascended to the primary cause of death in the developed world, thus making the research of the particular biological system imperative. Biofluid mechanics plays a significant role in this research, as analysis and understanding of the fluid mechanical conditions of the cardiovascular system will greatly assist in preventing, as well as curing the relevant diseases.

The aim of this project is the study of the arteries physiology and their aging behavior [1] via an in-vitro experimental layout that correlates the vessel's compliance, its resistance and the inertia of the fluid (blood) that is conveyed through it in a pulsating way employing an appropriate reciprocating mechanism.

Materials and Methods

The experimental set up (Fig. 1) included a horizontal rigid PVC tube (D=8 mm) connecting two transparent free-surface water plexiglass tanks filled with deionized water. A vertical reciprocating piston of adjustable speed n (rpm), playing the role of the ventricle, generates pulsating flow, being inside a tube which is connected at approximately the midpoint of the horizontal tube through a T-connector. The flow is directed from the left large tank (atrium) to the right smaller one by employing two check valves installed on either side of the T-connector. Between the reciprocating piston and the smaller tank, a rigid partially air-filled closed tank is connected to the horizontal tube, as well as a gate valve of adjustable gap y_R , between the last two tanks.

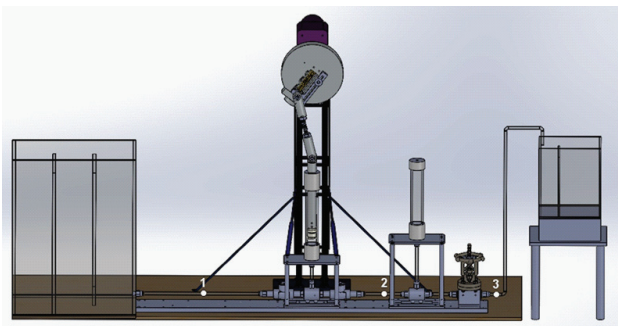


Figure 1: Experimental set up representing the vessel's compliance and resistance (windkessel effect). 1, 2, 3 points whereas three pressure catheters (TruWave-Edwards) recorded the static pressure.

In this way the so called windkessel effect is experimentally simulated, taking into account the shape of the arterial blood pressure waveform resulted by the interaction

between the stroke volume V_b of the reciprocating piston, the compliance of the vessel C (partially air-filled tank) and the resistance $R=R(y_R)$ of the smaller arteries and arterioles (vascular bed). Decreasing the amount of air inside the closed chamber, the compliance is reduced and the vascular aging is simulated.

Results and Discussion

For a given valve closing and stroke volume, an increase of the frequency of oscillation elevates the mean pressure and its amplitude (Fig. 2).

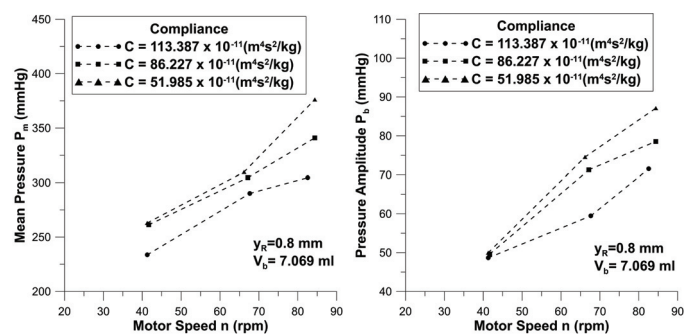


Figure 2. Mean pressure P_m (left panel) and its amplitude P_b (right panel) versus vessel's compliance (vascular aging) and motor speed n (rpm) corresponding to heart rate (bpm).

Mean pressure as well as its amplitude are decreasing functions of compliance for a given heart rate, vascular bed resistance and stroke volume.

Conclusions

The results show that pressure increases with vascular aging (decrease of compliance). The pressure rise impairs the efficient functioning of the heart with age since more energy has to be consumed by the heart for a constant blood perfusion to cover the needs of the body tissues. Various settings are allowed to be made in the experimental set up simulating the vessels' desirable parameters according to the age, heart stroke volume, heart rate and vascular bed resistance. This way, an experimental simulation can be made for a vessel of interest varying its compliance and ultimately quantifying and predicting pathologies of the circulatory system.

Keywords: vascular aging, experimental biofluid mechanics, windkessel effect, vessel compliance

References

1. S.S. Najjar, A. Scuteri and E.G. Lakatta, Arterial Aging. Is It an Immutable Cardiovascular Risk Factor?, Hypertension, 46(3): 454-462, 2005.